



Lehrstuhl für
Solartechnik



Diese Arbeit wurde vorgelegt am Lehrstuhl für Solartechnik.

Bestimmung von Wolkenhöhen für die Kurzfristprognose von Einstrahlungsleistungen für Solarkraftwerke

Masterarbeit

vorgelegt von

Marco Wirtz

im Studiengang

Energietechnik (M.Sc.)

Prüfer: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Robert Pitz-Paál

Betreuer: Pascal Kuhn, M.Sc.

Almería, den 01. Juni 2017

Eidesstattliche Versicherung

Ich versichere hiermit an Eides Statt, dass ich die vorliegende Masterarbeit mit dem Titel

Bestimmung von Wolkenhöhen für die Kurzfristprognose von Einstrahlungsleistungen für Solarkraftwerke

selbständig und ohne unzulässige fremde Hilfe erbracht habe. Ich habe keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt. Für den Fall, dass die Arbeit zusätzlich auf einem Datenträger eingereicht wird, erkläre ich, dass die schriftliche und die elektronische Form vollständig übereinstimmen. Die Arbeit hat in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner Prüfungsbehörde vorgelegen.

Almería, den 01. Juni 2017

Unterschrift

Belehrung:

§ 156 StGB: Falsche Versicherung an Eides Statt

Wer vor einer zur Abnahme einer Versicherung an Eides Statt zuständigen Behörde eine solche Versicherung falsch abgibt oder unter Berufung auf eine solche Versicherung falsch aussagt, wird mit Freiheitsstrafe bis zu drei Jahren oder mit Geldstrafe bestraft.

§ 161 StGB: Fahrlässiger Falscheid; fahrlässige falsche Versicherung an Eides Statt

(1) Wenn eine der in den §§ 154 bis 156 bezeichneten Handlungen aus Fahrlässigkeit begangen worden ist, so tritt Freiheitsstrafe bis zu einem Jahr oder Geldstrafe ein.

(2) Straflosigkeit tritt ein, wenn der Täter die falsche Angabe rechtzeitig berichtigt. Die Vorschriften des § 158 Abs. 2 und 3 gelten entsprechend.

Die vorstehende Belehrung habe ich zur Kenntnis genommen.

Almería, den 01. Juni 2017

Unterschrift

Abstract

In dieser Arbeit wird ein innovatives System zur Wolkenhöhenbestimmung untersucht, welches aus einer Wolkenkamera und einem *Cloud Shadow Speed Sensor* (CSS) besteht. Zur Validierung der Höhenmessungen kommt ein Ceilometer zum Einsatz.

Es werden 70 Tage mit unterschiedlichen meteorologischen Bedingungen untersucht. Die Messgenauigkeit der Höhenbestimmung hängt stark von der Art der Wolken, der Wolkenhöhe und der Existenz mehrerer übereinander angeordneter Wolken-schichten ab. Für Wolken mit einer Höhe von bis zu 5000 m beträgt die mittlere quadratische Abweichung (RMSE) zur Ceilometer-Messung 1280 m, die mittlere absolute Abweichung (MAE) 695 m und der BIAS 261 m. Wolken mit scharfer Berandung und geringer Transmissivität begünstigen die Messung. Die Existenz mehrerer Wolkenschichten hat einen negativen Einfluss auf die Messgenauigkeit.

Der CSS ermittelt Schattengeschwindigkeiten vorüberziehender Wolken und wird als zentrale Systemkomponente in dieser Arbeit gesondert untersucht. Es wird eine Methodik zur Charakterisierung von Verschattungen entwickelt, die den CSS zu einer multifunktionalen Messeinrichtung erweitert. Ferner werden konkrete Verbesserungen der im CSS implementierten Berechnungsmethoden erarbeitet.

Darüber hinaus wird ein alternatives System zur Wolkenhöhenbestimmung entwickelt, welches statt des CSS ein bereits vorhandenes Schattenkamera-System zur Bestimmung der Wolkengeschwindigkeiten verwendet. Für ein bereits existierendes Nowcasting-System, welches auf 4 Wolkenkameras basiert, wird eine Validierung der Wolkenhöhen durchgeführt.

Inhaltsverzeichnis

Abstract	i
Abbildungsverzeichnis	v
Tabellenverzeichnis	ix
Nomenklatur	xi
1 Einleitung	1
2 Stand der Technik	5
2.1 Methoden zur Wolkenhöhenbestimmung	5
2.2 Bestimmung von Wolkenbewegungsvektoren	8
2.2.1 Most-Correlated-Pair-Methode	10
2.2.2 Linear-Cloud-Edge-Methode	11
2.3 Systemkomponenten	14
2.3.1 Ceilometer	14
2.3.2 Wolkenkamera	14
2.3.3 Cloud Shadow Speed Sensor	15
2.3.4 LCE-Curve-Fitting-Methode	18
2.4 Bewegungserfassung in Wolkenkamerabildern	23
3 Datenauswertung und Verbesserung des Cloud Shadow Speed Sensors	31
3.1 Datenauswertung	31
3.1.1 Algorithmus zur Identifizierung von Verschattungsereignissen	32
3.1.2 Auswertung und Ergebnisse	36
3.2 Verbesserung der Bewegungsvektorbestimmung	48
3.3 Orthogonalität von Bewegungsvektor und Wolkenkante	56
4 Wolkenhöhenbestimmung mittels CSS-Kamera-System	63
4.1 Herleitung der Bestimmungsgleichung	63
4.2 Implementierung	67
4.3 Ergebnisse	71
4.4 Fehlerabschätzung	92
5 Alternative Verfahren zur Wolkenhöhenbestimmung	97
5.1 Wolken-/Schattenkamera-System	97

5.2	4-Kamera-System	108
6	Zusammenfassung und Ausblick	111
A	Anhang	115
A.1	Methodenübersicht zur Bewegungsvektorbestimmung	115
A.2	Vergleich der Methoden zur Bewegungsvektorbestimmung	116
A.3	Streudichte-Diagramme für Verschattungsklassen	118
A.4	Wolkenklassifizierung	120
	Literaturverzeichnis	127

Abbildungsverzeichnis

1.1	Überblick über die untersuchten Systeme zur Wolkenhöhenbestimmung	3
2.1	Most-Correlated-Pair-Methode	11
2.2	Linear-Cloud-Edge-Methode	12
2.3	Ceilometer-Messsignal für den 13.05.2016	14
2.4	Beispielbild einer Wolkenkamera am 16.06.2016	15
2.5	Cloud Shadow Speed Sensor	16
2.6	Einstrahlungssignale des CSS während eines Messintervalls	17
2.7	Berechnung der Signalverschiebung durch Kreuzkorrelation	17
2.8	Sensoranordnung CSS	19
2.9	LCE-Curve-Fitting-Methode	20
2.10	Numerisches Beispiel zur LCE-Curve-Fitting-Methode	21
2.11	Selektion der CSS Messungen gemäß Gütekriterien	22
2.12	Orthogonalitätsannahme der LCE-Curve-Fitting-Methode	24
2.13	Block-Matching-Methode	26
2.14	Phasenkorrelation	27
3.1	Konstruktion eines diskreten Messsignals aus Rohdaten	32
3.2	Clear-Sky-Forecast-Modell	33
3.3	Korrigiertes Clear-Sky-Forecast-Modell	35
3.4	Algorithmus zur Detektion von Verschattungen	37
3.5	Verschattungsdetektion am 16.06.2016	37
3.6	Relative Abweichung der Sensorsignale des CSS	38
3.7	Verteilung der Verschattungsdauer	39
3.8	Verteilung der Schattenstärke	39
3.9	Streudiagramm Verschattungen	41
3.10	Drei Beispieltage mit unterschiedlicher Bewölkungscharakteristik . .	43
3.11	Einstrahlungssignal für den 30.03.2016	43
3.12	Einstrahlungssignal für den 03.06.2016	44
3.13	Einstrahlungssignal für den 16.06.2016	44
3.14	Streudiagramm Verschattungen (3 Beispieltage)	45
3.15	Geschwindigkeitsverteilung der CSS Messungen	47
3.16	Streudiagramm CSS-Verschattungen	49
3.17	Berechnung des Bewegungsvektors auf Basis der LCE-CF-Methode	50
3.18	Bewegungsvektorbestimmung für vier Methoden im Vergleich (1) . .	52
3.19	Bewegungsvektorbestimmung für vier Methoden im Vergleich (2) . .	53

3.20	Vergleich der vier Methoden zur Bewegungsvektorbestimmung . . .	54
3.21	Auswahl der CSS Messungen bei verändertem Schwellenwert	56
3.22	Abhängigkeit der Messunsicherheit vom Residuum des Kosinus-Fits	57
3.23	Verteilung der Winkeldifferenz zwischen Bewegungsvektor und Schattenkante	59
3.24	Abhängigkeit des Korrekturfaktors von der Winkeldifferenz	60
3.25	Geschwindigkeitskorrektur LCE-CF-Methode	61
3.26	Verteilung der Winkeldifferenz für das Korrekturintervall	62
4.1	Skizze zur Wolkenhöhenbestimmung (2D)	64
4.2	Skizze zur Wolkenhöhenbestimmung (3D)	65
4.3	Segmentierung und Entzerrung eines Wolkenkamerabilds	69
4.4	Positionierung des Translationsvektors im Kamerabild	70
4.5	Ergebnis der Wolkenhöhenbestimmung für den 21.08.2016	72
4.6	Ergebnis der Wolkenhöhenbestimmung für den 01.12.2016	73
4.7	Ergebnis der Wolkenhöhenbestimmung für den 15.07.2016	74
4.8	Ergebnis der Wolkenhöhenbestimmung für den 14.05.2016	75
4.9	Ergebnis der Wolkenhöhenbestimmung für den 25.06.2016	75
4.10	Ergebnis der Wolkenhöhenbestimmung für den 25.08.2016	76
4.11	Ergebnis der Wolkenhöhenbestimmung für den 03.06.2016	77
4.12	Ergebnis der Wolkenhöhenbestimmung für den 27.03.2016	78
4.13	Ergebnis der Wolkenhöhenbestimmung für den 10.06.2016	79
4.14	Ergebnis der Wolkenhöhenbestimmung für den 13.05.2016	80
4.15	Ergebnis der Wolkenhöhenbestimmung für den 29.09.2016	81
4.16	Ergebnis der Wolkenhöhenbestimmung für den 28.09.2016	82
4.17	Ergebnis der Wolkenhöhenbestimmung für den 31.08.2016	83
4.18	Ergebnis der Wolkenhöhenbestimmung für den 01.09.2016	84
4.19	Häufigkeitsverteilung Ceilometer-Wolkenhöhen	85
4.20	Streudichte-Diagramm für das CSS-Kamera-System	86
4.21	Messdifferenzen für verschiedene Wolkenhöhen	87
4.22	Kumulierte Häufigkeit der Messungen über der Messdifferenz	89
4.23	Streudichte-Diagramme für 4 Verschattungsklassen	90
4.24	Streudichte-Diagramm für das CSS-Kamera-System bei kontinuierlicher Messwertausgabe	91
4.25	Sensitivität des Winkelterms	94
4.26	Häufigkeitsverteilung des Betrags des Winkelterms	95
5.1	Schattenkamera-System	99
5.2	Überlagerung der binären Schattenkarten	100
5.3	Bildpaar mit einem Verschattungsrad von unter 5 %	101
5.4	Lokalisierung der Schattenkante	103
5.5	Streudichte-Diagramm der Geschwindigkeiten des Schattenkamera-Systems	104

5.6	Streudichte-Diagramm der Wolkenhöhen für das Wolken-/Schattenkamera-System	105
5.7	Höhenbestimmung mit Schattenkamera-System für den 01.09.2016 .	106
5.8	Höhenbestimmung mit Schattenkamera-System für den 21.08.2016 .	107
5.9	Voxel-Carving-Methode zur Wolkenhöhenbestimmung	108
5.10	Höhenbestimmung mit 4-Kamera-System für den 19.09.2015	109
5.11	Höhenbestimmung mit 4-Kamera-System für den 01.10.2015	110
A.1	Methodenübersicht zur Bewegungsvektorbestimmung	115
A.2	Methodenvergleich (21.08.2016)	116
A.3	Methodenvergleich (01.09.2016)	117
A.4	Streudichte-Diagramme für 4 Verschattungsklassen (1)	118
A.5	Streudichte-Diagramme für 4 Verschattungsklassen (2)	119
A.6	Cirrus-Wolken	122
A.7	Cirrostratus-Wolken	123
A.8	Altostratus-Wolken	123
A.9	Altostratus-Wolken	124
A.10	Nimbostratus-Wolken	124
A.11	Kumuluswolken	125

Tabellenverzeichnis

3.1	Klassifizierung der Verschattungen (223 Tage)	42
3.2	Klassifizierung der Verschattungen (3 Beispieltage)	46
3.3	Vom CSS korrekt detektierte Verschattungen nach Klassen	48
3.4	Vergleich der LAD-, LTS- und LMS-Methode	55
4.1	Fehlergrößen nach Verschattungsklasse	88

Nomenklatur

Formelzeichen und Einheiten

Symbol	Bedeutung	Einheit
a_1, a_2	Konstanten zur Berechnung der GHI nach Ineichen u. Perez (2002)	—
CC	Kreuzkorrelationsmatrix	—
C_i	Wolkenhöhenmessung Ceilometer	m
D	Sensorabstand	m
d	Projizierte Länge des Ortsvektors u	m
f_1, f_2	Konstanten zur Berechnung der GHI nach Ineichen u. Perez (2002)	—
f, g	Grauwertematrix eines Bildausschnitts	—
\hat{f}, \hat{g}	Arithmetisches Mittel der Elemente der Grauwertematrizen f, g	—
F, G	Fouriertransformation der Grauwertematrizen f, g	—
F^*	Komplex-konjugierte Matrix von F	—
GHI	GHI-Messwert	W/m ²
GHI^{CSF}	GHI des Clear-Sky-Forecasts	W/m ²
GHI_{min}	Minimale GHI während einer Verschattung	W/m ²
h	Wolkenhöhe	m
h	Anzahl der berücksichtigten Stützstellen für den Kosinus-Fit	—
I	Grauwertematrix	—
I_x, I_y	Örtlicher Gradient der Grauwertematrix	1/pixel
I_t	Zeitlicher Gradient der Grauwertematrix	1/s
I_0	Solarkonstante	W/m ²
k_{GHI}	Clear-Sky-Index	—
K_{CC}	Kreuzkorrelationskoeffizient	—
k_i	Pixelanzahl einer Überlagerungsklasse	—
L	Messwerte eines Messintervalls	W/m ²
\bar{L}	Arithmetisches Mittel der Messwerte	W/m ²

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Formelzeichen und Einheiten

Symbol	Bedeutung	Einheit
\hat{L}	Standardabweichung der Messwerte	W/m ²
M_{CC}	Phasenkorrelationsmatrix	—
m	Gütefaktor der Kreuzkorrelation	—
N	Breite des Bildausschnitts	pixel
n	Anzahl der Sensoren	—
n	Anzahl der Messungen im Intervall	—
p_u	Anzahl der unverschatteten Pixel	—
p_v	Anzahl der verschatteten Pixel	—
R	Kreuzkorrelationskoeffizient	—
R	Residuum	—
r	Normiertes Residuum	—
\hat{r}	Schwellenwert des normierten Residuums	—
r_i	Ortsvektoren (LCE-Methode)	—
ΔS	Maximale Abweichung der Differenzen nach Reno u. a. (2012)	W/m ²
SS	Schattenstärke	%
Δt	Zeitabstand zwischen Winkelmessungen	s
t_i	Gemessener Signalversatz	s
$t_{i,Fit}$	Signalversatz gemäß Kosinus-Fit	s
t_{RMS}	Mittlere quadratische Streuung der Signalversätze	s
T	Translationsvektor	pixel
T_x, T_y	x-/y-Koordinaten des Translationsvektors	pixel
T_L	Linke Trübung	—
t_{on}, t_{oe}	Zeitabstände (LCE-Methode)	s
u	Ortsvektor einer Wolke	m
v	Wolkengeschwindigkeit	m/s
v^\perp	Geschwindigkeit in Wolkenzugrichtung	m/s
v_c	Korrigierte Wolkengeschwindigkeit	m/s
Δv	Relative Geschwindigkeitsunsicherheit	—
VG	Verschattungsgrad	%

Griechische Formelzeichen

Symbol	Bedeutung	Einheit
α	Azimutwinkel	Grad

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Griechische Formelzeichen

Symbol	Bedeutung	Einheit
α	Glattheitsparameter nach Horn u. Schunck (1981)	—
β	Zenitwinkel	Grad
β	Winkel der Wolkenkante	Grad
γ	Elevationswinkel	Grad
Γ	Kriterium für die Streuung des Translationsvektors	—
$\hat{\Gamma}$	Schwellenwert für das Streuungskriterium	—
δ	Winkel zwischen Wolkenkante und Bewegungsrichtung	Grad
δ_i	Positionswinkel der Sensoren	Grad
ρ_i	Charakteristisches Verhältnis einer Überlagerungsklasse	—
σ_f, σ_g	Standardabweichung der Elemente der Grauwertematrizen f, g	—
$\sigma_{x,k}, \sigma_{y,k}$	Standardabweichung der letzten k x-/y-Koordinaten des Translationsvektors	pixel
$\sigma_{\Delta GHI}$	Standardabweichung der GHI-Messwerte	W/m ²
ϕ	Wolkenzugrichtung	Grad
$\Delta\phi$	Maximale Winkelauflösung	Grad
φ	Schwellenwert für den Verschattungsgrad	%
Ω	Kreuzleistungsspektrum	—

Abkürzungen

Abkürzung	Bedeutung
AM	Air Mass
CSS	Cloud Shadow Speed Sensor
GHI	Global Horizontal Irradiance
GTI	Global Tilted Irradiance
LAD	Least Absolute Deviation
LCE	Linear-Cloud-Edge-Methode
LCE-CF	Linear-Cloud-Edge-Curve-Fitting-Methode
LMS	Least Median Squares
LSQ	Least Squares
LTS	Least Trimmed Squares

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Abkürzungen

Abkürzung	Bedeutung
lidar	Light Detection and Ranging
MAE	Mean Absolute Error
MCP	Most-Correlated-Pair-Methode
PSA	Plataforma Solar de Almería
RMSE	Root Mean Square Error
UTC	Coordinated Universal Time

1 Einleitung

Eine der größten Herausforderungen des 21. Jahrhunderts stellt der globale Klimawandel dar, dessen erhebliche Auswirkungen auf Umwelt und Gesellschaft bereits heutzutage zu spüren sind. Wichtigster Treiber dieser Entwicklung ist die stetig steigende Emissionsbelastung, welche durch die Verbrennung fossiler Energieträger hervorgerufen wird.

Vor diesem Hintergrund gewinnt die Nutzung regenerativer Energieträger immer mehr an Bedeutung. Bei der Realisierung einer nachhaltigen und kostengünstigen Energieversorgung nimmt die Sonnenenergie eine zentrale Rolle ein. Zum einen ist ihr theoretisches Energiepotential gigantisch: Die jährlich auf der Erde ankommende Solarstrahlung übersteigt den weltweiten Primärenergieverbrauch um den Faktor 10 000 (Quaschnig (2015)). Zum anderen gehen nahezu alle heutzutage genutzten Formen der regenerativen Energiegewinnung direkt oder indirekt (Windenergie, Wasserkraft, Bioenergie) auf solare Einstrahlung zurück. Die direkte Nutzung der Sonnenenergie zur Stromerzeugung erfolgt durch photovoltaische und solarthermische Kraftwerke.

Wesentliche Herausforderungen bei der Nutzung regenerativer Energieträger im Vergleich zu herkömmlichen Erzeugungsarten stellen die hohe zeitliche Variabilität und die schlechte Vorhersagbarkeit dar. Die relevanten Vorhersagezeiträume reichen von wenigen Minuten bis hin zu einigen Tagen. Plötzliche Leistungsschwankungen von Solarkraftwerken stellen in Anbetracht des stetig steigenden Anteils am Gesamtzeugungsmarkt ein zunehmendes Problem für die Netzstabilität und Versorgungssicherheit dar (von Appen u. a. (2013)). Kurzfristige Schwankungen solarer Einstrahlung werden vor allem durch vorüberziehende Wolken verursacht. Zur Kurzfristvorhersage derartiger Fluktuationen werden zurzeit vermehrt Nowcasting-Systeme entwickelt. Diese Systeme erfassen die aktuelle Position von Wolken und berechnen ihre zukünftigen Positionen auf Basis des Bewegungsvektors. Als zentrale Komponente dieser Systeme dienen häufig Wolkenkameras (engl. *all sky imager*), welche hemisphärische Bilder des Himmels erstellen. In diesen Bildern werden Wolkenobjekte identifiziert und ihre Position in einem 3-dimensionalen Wolkenmodell abgebildet. Aus der Abfolge mehrerer zeitlich hintereinander aufgenommener Bilder kann zudem die Wolkengeschwindigkeit und -zugrichtung ermittelt werden. Mit Hilfe dieser Informationen wird die Position der Wolken für zukünftige Zeitpunkte extrapoliert. Aus der Wolkenposition, dem bekannten Sonnenstand und einem Geländemodell kann anschließend der Schattenwurf auf dem Boden berechnet werden (Chow u. a. (2011)).

Während die horizontale Position der Wolken nahe dem Kamerastandort aus den Bildern präzise erfasst werden kann, erweist sich die Bestimmung der Wolkenhöhe als komplex und fehleranfällig. Eine falsche Wolkenhöhe hat dabei Auswirkungen auf zwei zentrale Berechnungsschritte (Nguyen u. Kleissl (2014)): Zum einen wird die Wolkengeschwindigkeit falsch ermittelt. Zum anderen führt je nach Elevationswinkel eine fehlerhafte Bestimmung der Wolkenhöhe zu signifikanten Abweichungen der Schattenprojektion auf dem Erdboden. Der Fehler der Schattenposition skaliert dabei linear mit dem Fehler der Wolkenhöhe und hängt maßgeblich vom Elevationswinkel ab. Für einen Elevationswinkel von 45° führt ein Fehler von 100 m bei der Wolkenhöhe zu einer Abweichung der Schattenposition um ebenfalls 100 m (Peng u. a. (2015)). Für kleinere Elevationswinkel steigt der relative Fehler der Schattenposition an.

Traditionelle Methoden zur Bestimmung von Wolkenhöhen stellen Radiosonden, Ceilometer und satellitenbasierte Systeme dar. Diese Systeme weisen aufgrund ihrer hohen Kosten (Ceilometer), ihrer geringen örtlichen (satellitenbasierte Systeme) oder geringen zeitlichen Auflösung (Radiosonden) erhebliche Defizite auf und erweisen sich für Kurzfristvorhersage-Systeme als ungeeignet (Wang u. a. (2016)). Aktuelle Forschungsansätze zielen darauf ab, mit Hilfe von Wolkenkameras sowie weiteren Sensoren, wie beispielsweise Pyranometer, präzise, kostengünstige und zeitlich sowie örtlich hochauflösende Systeme zu entwickeln. Ein vielversprechendes System bestehend aus einer Wolkenkamera sowie einem *Cloud Shadow Speed Sensor* (CSS) wird im Rahmen dieser Arbeit untersucht. Es wird die Einsatzfähigkeit des Systems unter realen, praxisnahen Bedingungen getestet und die Genauigkeit der Höhenmessungen mit Hilfe eines Ceilometers validiert. Die vorliegende Arbeit gliedert sich inhaltlich wie folgt: In Kapitel 2 wird zunächst ein Überblick über den derzeitigen Forschungsstand der Wolkenhöhenbestimmung gegeben. Ferner werden die verwendeten Systemkomponenten beschrieben und insbesondere die Funktionsweise des CSS ausführlich erläutert. Kapitel 3 befasst sich mit der Auswertung und Validierung der Daten des CSS. In Kapitel 4 wird das System zur Wolkenhöhenbestimmung vorgestellt und die erzielten Ergebnisse präsentiert. In Kapitel 5 werden zwei alternative Methoden zur Wolkenhöhenbestimmung vorgestellt: Eines der Systeme verwendet neben einer Wolkenkamera ein bereits vorhandenes Schattenkamera-System, welches an Stelle des CSS die Wolkengeschwindigkeiten ermittelt. Außerdem wird für ein weiteres System, welches auf 4 Wolkenkameras basiert, eine Validierung durchgeführt. Ein Überblick über die in dieser Arbeit untersuchten Systeme gibt Abbildung 1.1. Kapitel 6 fasst die Ergebnisse der Arbeit zusammen und gibt einen Ausblick.

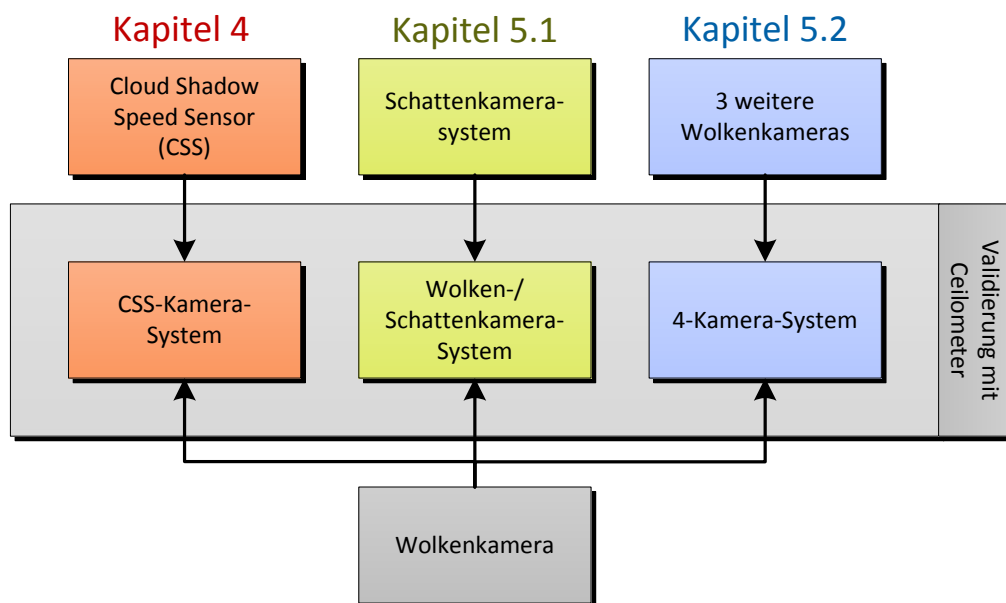


Abbildung 1.1: Überblick über die in dieser Arbeit untersuchten Systeme zur Wolkenhöhenbestimmung

2 Stand der Technik

In diesem Kapitel wird in Abschnitt 2.1 zunächst ein Überblick über die wichtigsten in der Literatur vorgestellten Methoden zur Wolkenhöhenbestimmung gegeben. Die zentrale Komponente des in dieser Arbeit untersuchten Systems zur Wolkenhöhenbestimmung ist der *Cloud Shadow Speed Sensor* (CSS). Seine Entwicklung basiert auf grundlegenden Arbeiten zur Bewegungsvektorbestimmung von Wolken, welche in Kapitel 2.2 vorgestellt werden. Die verwendeten Komponenten des Systems zur Wolkenhöhenbestimmung und insbesondere die Funktionsweise des CSS werden in Abschnitt 2.3 erläutert. In Abschnitt 2.4 werden grundlegende Methoden zur Erfassung von Bewegungen in Wolkenkamerabildern vorgestellt.

2.1 Methoden zur Wolkenhöhenbestimmung

In der Literatur wird eine Vielzahl verschiedener Methoden zur Bestimmung von Wolkenhöhen vorgestellt. Eine weitverbreitete Methode stellt der Einsatz von Radiosonden dar (Wang u. Rossow (1995)). Radiosonden bestehen im Wesentlichen aus einem Wetterballon, einem Funksender sowie einer Messapparatur zur Aufzeichnung meteorologischer Daten. Durch den vom Wetterballon erzeugten Auftrieb steigt die Sonde auf eine Höhe von 20 bis 30 km auf und übermittelt dabei kontinuierlich Messdaten an eine Bodenstation. Die Anfänge der Radiosondentechnologie reichen bis in die 1920er Jahre zurück, wobei ab den 1940er Jahren ausgereifte Radiosonden-Modelle zur Erforschung der atmosphärischen Bedingungen zur Verfügung stehen (Belin (1948), DuBois u. a. (2002)). Heutzutage können mit Hilfe von Radiosonden eine Vielzahl meteorologischer Daten, wie die relative Luftfeuchtigkeit, die Lufttemperatur oder der Luftdruck mit hoher Genauigkeit erfasst werden. Die erhobenen Daten finden Anwendung in Wettervorhersage- oder Klimamodellen (Jensen u. a. (2016)). Mit Hilfe des Verlaufs der relativen Luftfeuchtigkeit über der Höhe kann auf die Existenz von Wolkenschichten in der Atmosphäre geschlossen werden. Von besonderem Interesse ist dabei die Höhenbestimmung von Wolkenunter- und Wolkenobergrenzen (engl. *cloud-base height* beziehungsweise *cloud-top height*), die Dicke der Wolkenschicht sowie die vertikale Anordnung mehrerer Wolkenschichten übereinander. Mit Hilfe von Radiosonden ist es möglich, dicke Wolkenschichten geringer Höhe mit großer Zuverlässigkeit und Genauigkeit zu erkennen. Schwächen weist die Technologie jedoch bei dünnen Wolken in großen Höhen auf. Eine ausführliche Analyse von Wolkenstrukturen für 30 verschiedene Wetterstationen sowie eine

Langzeitstudie über einen Zeitraum von 20 Jahren auf Basis der Radiosondentechnologie findet sich in Wang u. Rossow (1995) beziehungsweise Wang u. a. (2000). Die mittels Radiosonden gewonnenen meteorologischen Daten weisen eine hohe Genauigkeit auf. Validierungen von Radiosondenmessungen finden sich in Zhang u. a. (2010) und Zhang u. a. (2013). Ein großer Nachteil von Radiosonden besteht darin, dass die zeitliche Auflösung der Messungen gering ist. Oftmals werden für einen Standort täglich nur eine oder zwei Messungen durchgeführt. Aufgrund dieser geringen zeitlichen Auflösung sind Radiosonden zur Bestimmung von Wolkenhöhen für Kurzfristvorhersage-Systeme solarer Einstrahlung ungeeignet.

Neben Radiosonden haben sich Ceilometer als präzises und zeitlich hochauflösendes Messinstrument etabliert. Ceilometer sind in der Lage Wolkenuntergrenzen und Eindringtiefen mehrerer Wolkenschichten zu bestimmen (Gaumet u. a. (1998)). Neben Wolken können ebenfalls Aerosolschichten detektiert werden (Münkel u. a. (2004), Heese u. a. (2010)). Ceilometer senden einen hoch-energetischen Laserimpuls von einigen Nanosekunden und einer Wellenlänge von 1064 nm senkrecht zur Erdoberfläche aus. Dieser wird von Wolken oder Aerosolschichten zurückgestreut. Die Rückstreuung wird vom Ceilometer detektiert und aus der Laufzeitdifferenz zwischen Aussendung des Laserimpulses und Eintreffen der Rückstreuung kann die Höhe der unterschiedlichen Schichten berechnet werden (Klett (1981)). Die zugrunde liegende Messmethode wird *lidar* genannt (engl. light detection and ranging) (Carnuth u. Reiter (1986)). In der Literatur finden sich ausführliche Validierungen von Ceilometern verschiedener Hersteller. Das in dieser Arbeit verwendete Modell (Jenoptik CHM15k) wird gegen ein Modell eines anderen Herstellers in Martucci u. a. (2010) validiert. Hierbei wird ein durchschnittlicher BIAS von 160 m sowie ein erhebliches Maß an Streuung zwischen den Messungen beider Ceilometer festgestellt. Weitere Validierungen mittels Satellitentechnik finden sich in Sharma u. a. (2016). Ceilometer stellen mit Anschaffungskosten von einigen zehntausend Euro teure Messgeräte dar. Sie werden vor allem in der wissenschaftlichen Forschung, insbesondere der Meteorologie, sowie in der Luftfahrtindustrie eingesetzt. An Flughäfen dienen Ceilometer dazu, sicherheitsrelevante Informationen über die Höhe von Wolkenschichten bereitzustellen. Im Gegensatz zu Radiosonden sind Ceilometer in der Lage die Wolkenhöhe mehrere Male in der Minute zu bestimmen und eignen sich daher besser für Kurzfristvorhersage-Systeme. Zentraler Nachteil ist neben den hohen Anschaffungskosten, dass lediglich Wolken vertikal über dem Ceilometer erfasst werden.

Ein anderer Ansatz zielt darauf ab, die Wolkenhöhe aus dem Spektrum der Wärmestrahlung der Wolken, welches mit einer Wärmebildkamera aufgenommen wird, zu bestimmen (Shaw u. Nugent (2013)). Dieser Ansatz basiert darauf, dass Wolken in großer Höhe aufgrund ihrer geringen Temperatur ein anderes Strahlungsspektrum aufweisen als Wolken niedriger Höhe. Ein Vorteil der Technologie im Vergleich zu anderen kamerabasierten Systemen ist, dass Wolkenhöhen nicht nur tagsüber sondern auch nachts ermittelt werden können. Im Gegensatz zu Ceilometern können auch Wolken, die sich nicht vertikal über der Messeinrichtung befinden, erfasst

werden. Bei der Methodik wird davon ausgegangen, dass Wolken schwarze Strahler darstellen. Diese Annahme stellt sich jedoch insbesondere für Wolken in großen Höhen als unhaltbar heraus. Die Methode erweist sich daher nur für Wolken bis zu einer Höhe von weniger als 3000 m als geeignet (Liu u. a. (2013), Liu u. a. (2015)). Die Wolkenhöhen werden aufgrund der Annahme von schwarzen Strahlern außerdem systematisch überschätzt.

Weitere Methoden zur Wolkenhöhenbestimmung stellen Radarsysteme (Clothiaux u. a. (2000), Comstock u. a. (2002)) oder numerische Wettervorhersagemodelle dar. In Killius u. a. (2015) wird die Wolkenhöhenberechnung von numerischen Wettervorhersagemodellen mit einem Ceilometer über einen Zeitraum von einem Jahr validiert. Es wird ein RMSE von 5527 m und ein BIAS von 1092 m erzielt. Sowohl infrarot- als auch radarbasierte Systeme können auch auf Satelliten zum Einsatz kommen (Seaman u. a. (2017), Prata u. Turner (1997), Dessler u. a. (2006)). Mit satellitenbasierten Systemen kann jedoch nur die oberste Wolkenschicht vermessen werden.

Zur Wolkenhöhenbestimmung kommen vermehrt rein optische Methoden zum Einsatz. Zentrale Komponente stellen hierbei Wolkenkameras (engl. *all sky imager*) dar. Diese erstellen hemisphärische Bilder des Himmels mit Hilfe eines hemisphärischen Spiegels oder eines Fischaugenobjektivs (Shields u. a. (1998), Long u. a. (2006), Blanc u. a. (2016)). Eine Vielzahl von Methoden zur Wolkenhöhenbestimmung basieren auf Photogrammetrie. Erste Forschungen zur Wolkenhöhenbestimmung mittels Photogrammetrie fanden bereits Ende des 19. Jahrhunderts statt (Koppe (1896)). Die Grundidee ist, aus mehreren Bildaufnahmen die 3-dimensionale Form und räumliche Lage von Objekten zu bestimmen. Die gleiche Methodik machen sich Lebewesen beim räumlichen Sehen zu nutze. Durch die Betrachtung der Umwelt mit zwei Augen, ist es dem menschlichen Gehirn möglich, ein räumliches Bild seiner Umgebung zu gewinnen und räumliche Abstände abzuschätzen, ohne dass eine kontinuierliche Bewegung des Kopfes notwendig ist. Zur Wolkenhöhenbestimmung werden zwei oder mehr Kameras eingesetzt, deren Bilder in ein räumliches Modell umgerechnet werden. Vorteil dieser Methodik ist, dass sie die Wolkenhöhe mit einer hohen Frequenz, feiner Auflösung und in Echtzeit bestimmen können. Erste Untersuchungen wurden von Allmen u. Kegelmeyer Jr (1996) vorgestellt und von Kassianov u. a. (2005) sowie Seiz u. a. (2007) weiterentwickelt. Nguyen u. Kleissl (2014) entwickelten ein System für den Sonderfall einer einzelnen, homogenen Wolkenschicht. Hierbei wird zunächst eine Segmentierung der Wolkenkamerabilder vorgenommen. Unter Segmentierung wird die Identifizierung von bewölkten Bildbereichen verstanden. Anschließend werden beide segmentierten Bilder in Überlagerung gebracht. Hierbei ergibt sich die horizontale Position der Überlagerung aus den bekannten Positionen der Kameras. Die Wolkenhöhe ergibt sich aus der vertikalen Position, bei der die Wolken beider Bilder bestmöglich übereinander liegen. Ein Nachteil des Systems ist, dass lediglich die Höhe *einer* Wolkenschicht bestimmt werden kann (Kleissl u. a. (2016)). Darüber hinaus ist eine exakte geometrische Kalibrierung der Kameras von großer Wichtigkeit (Urquhart u. a. (2015)). Ein anderer von Beekmans u. a.

(2016) vorgestellter Ansatz ermöglicht es die Höhe einzelner Wolkenstrukturen mit zwei Wolkenkameras zu bestimmen, welche lediglich 300 m voneinander entfernt sind. Die Methode basiert auf dem Verfahren der dichten Stereobildzuordnung (engl. *dense stereo matching*). Hierbei werden aus einer Abfolge von zwei oder drei Bildern 3-dimensionale Punktwolken erzeugt, aus denen die Höhe der Wolken abgeleitet werden können (Heinrichs u. a. (2007)). Die zu Grunde liegende Methode findet in vielen weiteren Forschungsbereichen Anwendung: Es können beispielsweise 3-dimensionale Gebäudemodelle aus einer Reihe von Luftbildern erzeugt werden oder bei Fahrerassistenzsysteme kann mit Hilfe von zwei Kameras ein 3-dimensionales Modell der Verkehrssituation erstellt werden (Bachmann (2010)).

In Wang u. a. (2016) wird zum ersten Mal eine Methode zur Wolkenhöhenbestimmung vorgestellt, die auf einem CSS und einer Wolkenkamera basiert und somit große Ähnlichkeit zu der in Kapitel 4 vorgestellten Methodik aufweist. Bei dem in Wang u. a. (2016) untersuchten System werden die Wolkenkamerabilder zunächst segmentiert und es wird die Verschiebung der Wolken in zwei aufeinanderfolgenden Bildern mittels Kreuzkorrelation bestimmt. Auf diese Weise wird eine Pixelgeschwindigkeit v_{Pixel} des Wolkenfeldes in pixel/s ermittelt. Die Wolkengeschwindigkeit v_{CSS} in m/s wird durch den CSS gemessen. Zur Bestimmung der Wolkenhöhe h wird der Zusammenhang

$$h = \frac{v_{CSS}N}{2v_{Pixel} \tan \theta} \quad (2.1)$$

verwendet, wobei θ dem Zenitwinkel des Sichtfelds der Wolkenkamera entspricht und N der Anzahl der Pixel des segmentierten Bildausschnitts in einer Dimension. Das System wird in San Diego, Kalifornien in unmittelbarer Küstennähe für 27 Tage getestet. An diesem Standort werden vor allem Kumuluswolken mit einer Höhe von unter 1000 m beobachtet. Bei lediglich 2 untersuchten Tagen überschreitet die durchschnittliche Wolkenhöhe 1000 m. Die Bewölkungssituation unterscheidet sich damit fundamental von der auf der Plataforma Solar de Almería, auf der sehr viel komplexere und höhergelegene Wolkenstrukturen beobachtet werden. Die Höhenmessungen werden mit Hilfe eines Ceilometers validiert. Das System weist für die ausgewählten Tage einen auf die durchschnittliche Wolkenhöhe bezogenen RMSE von 17 % auf. Für die 25 Tage mit einer durchschnittlichen Wolkenhöhe von unter 1000 m verbleibt der RMSE unter 200 m.

2.2 Bestimmung von Wolkenbewegungsvektoren

Wolkenbewegungsvektoren sind für die Kurzfristvorhersage von Wolkenverschattungen von zentraler Bedeutung. Die Wolkengeschwindigkeit hat unmittelbaren Einfluss auf den berechneten Zeitpunkt zu dem der Schatten am Kraftwerkstandort erwartet wird, die Dauer der Verschattung sowie auf den Gradienten des Leistungsabfalls des Solarkraftwerks. Es sind eine Vielzahl unterschiedlicher Verfahren zur

Bestimmung von Wolkenbewegungsvektoren erforscht worden. Eine Klasse bilden die satellitengestützten Methoden (Hammer u. a. (1999)). Hierbei wird mittels Tracking-Verfahren aus mehreren zeitlich aufeinander folgenden Satellitenbildern die Bewegungsrichtung und -geschwindigkeit von Wolken ermittelt (Heinemann u. a. (2006)). Die Bewegungserfassung zwischen zwei Bildern erfolgt dabei beispielsweise mittels Kreuzkorrelation (Leese u. a. (1970), Leese u. a. (1971), Rutledge u. a. (1991) und Hamill u. Nehr Korn (1993)). Für satellitengestützte Methoden finden sich in der Literatur Vorhersagezeiträume von bis zu 6 Stunden (Heinemann u. a. (2006)). Für größere Vorhersagezeiträume von bis zu 2 Tagen kommen numerische Wettervorhersagemodelle zum Einsatz, welche erstmalig in Jensenius u. Cotton (1981) behandelt werden. Numerische Wettervorhersagen werden eingehend in Perez u. a. (2013) und Mathiesen u. Kleissl (2011) validiert. Für Vorhersagezeiträume unter einer Stunde erzielen jedoch weder satellitengestützte Systeme noch numerische Wettermodelle zufriedenstellende Ergebnisse (Remund u. a. (2008), Perez u. a. (2010)). Ein Schwachpunkt satellitenbasierter Systeme ist neben der geringen räumlichen und zeitlichen Auflösung vor allem die Datenübertragung und die damit verbundene zeitliche Verzögerung zwischen Messung und Datenverfügbarkeit.

Zur Kurzfristvorhersage von Zeiträumen bis zu einer Stunde wurden daher lokale, am Boden installierte Messsysteme zur Bewegungsvektorbestimmung entwickelt (Schenk u. a. (2015)). Derartige Systeme basieren auf zeitlich hochauflösenden Einstrahlungssensoren. Diese sind in einer bestimmten räumlichen Anordnung am Boden installiert, sodass aus der Analyse der Einstrahlungssignale die Bewegungsvektoren vorüberziehender Wolken abgeleitet werden können. In der Literatur wurden verschiedene Sensoranordnungen und Berechnungsmethoden vorgestellt. Baldwin u. Collins (2015) entwickelten ein System bestehend aus einer Vielzahl von Sensoren, die auf zwei konzentrischen Kreisen angeordnet werden. In Nomura u. a. (2017) wird eine Anordnung aus 4 Einstrahlungssensoren verwendet. Bosch u. a. (2013) entwickeln zwei Methoden zur automatisierten Bestimmung von Wolkenbewegungsvektoren: die *Most-Related-Pair*-Methode und die *Linear-Cloud-Edge*-Methode. Beide Methoden verwenden eine Anordnung, bei der 7 Pyranometer auf einem Halbkreis um ein zentrales Pyranometer angeordnet werden. Da die beiden Methoden in ähnlicher Weise im *Cloud Shadow Speed Sensor* (CSS) zur Auswertung genutzt werden, werden diese im Folgenden näher vorgestellt.

Die Grundidee beider Ansätze basiert auf der Analyse zeitlich hochaufgelöster Einstrahlungsmessungen. Verschattet eine Wolke einen Einstrahlungssensor, fällt das Signal in kurzer Zeit deutlich ab. Sofern dieser Abfall bei allen Sensoren registriert wird, kann der zeitliche Versatz des Signalabfalls durch Kreuzkorrelation bestimmt werden. Aus der bekannten räumlichen Distanz der Sensoren lässt sich anschließend die Wolkengeschwindigkeit ableiten. Bei beiden Methoden wird angenommen, dass die Wolkengeschwindigkeit zwischen der Verschattung des ersten und des letzten Sensors konstant ist. Außerdem wird angenommen, dass der Bewegungsvektor des Schattens am Boden dem Bewegungsvektor der Wolke entspricht. In Bosch u. a. (2013) werden beide Methoden direkt miteinander validiert, wobei eine gute

Übereinstimmung der Ergebnisse festgestellt wird. Eine weitere Validierung findet sich in Bosch u. Kleissl (2013). Beide Methoden weisen jedoch einige fundamentale Nachteile auf, welche ihre Anwendbarkeit einschränken. Zum einen werden große Einstrahlungsgradienten benötigt, um verlässliche Ergebnisse erzielen zu können. Dies ist beispielsweise bei scharf berandeten Wolken mit geringer Transmissivität der Fall. Für Zustände dauerhafter Bewölkung können keine Wolkengeschwindigkeiten ermittelt werden.

2.2.1 Most-Correlated-Pair-Methode

Die *Most-Correlated-Pair*-Methode (MCP) basiert auf Arbeiten von Hammer u. Stolzenburg (1993) sowie Hinkelman u. a. (2011). Grundlegende Idee ist, dass die Berandung der Wolke an jedem Punkt eine einzigartige Struktur aufweist. In der Folge ist auch der Signalverlauf zweier Sensoren, die von zwei unterschiedlichen Punkten der Wolkenkante verschattet werden, unterschiedlich. Lediglich zwei Sensoren, welche vom gleichen Punkt der Wolkenkante verschattet werden, weisen den gleichen charakteristischen Signalverlauf auf. Bei der Methode werden die Signalverläufe aller Sensoren miteinander verglichen und diejenigen ausgewählt, die sich am ähnlichsten sind. Zur Bestimmung der Ähnlichkeit zweier Signalverläufe wird die Kreuzkorrelation verwendet. Aus der Kreuzkorrelation kann ebenfalls der zeitliche Versatz der beiden Signale t ermittelt werden. Aus der bekannten räumlichen Distanz D der Sensoren folgt anschließend die Schattengeschwindigkeit zu

$$v = \frac{D}{t} \quad (2.2)$$

Das Prinzip der MCP-Methode ist in Abbildung 2.1 veranschaulicht. Ein Nachteil dieser Methode ist die geringe Auflösung der Richtungsinformation. Bei dem in Bosch u. a. (2013) vorgestellten System werden 8 Sensoren verwendet, wobei 7 Sensoren halbkreisförmig um einen zentralen Sensor angeordnet sind. Die maximale Richtungsauflösung beträgt hierbei 30° . Für den allgemeinen Fall von n Sensoren und einer ebenfalls halbkreisförmigen Anordnung beträgt die Winkelauflösung

$$\Delta\phi = \frac{180^\circ}{n-2} \quad (2.3)$$

Ebenfalls führt die endliche Anzahl an Sensoren zu einer relativen Unsicherheit in der berechneten Geschwindigkeit von

$$\Delta v = 1 - \cos\left(\frac{\Delta\phi}{2}\right) \quad (2.4)$$

Für eine Anordnung von 8 Sensoren beträgt diese Unsicherheit 3,4 %. Die Richtungsungenauigkeit sowie der relative Geschwindigkeitsfehler lassen sich durch den Einsatz einer höheren Anzahl von Sensoren verringern. In der Praxis sollten jedoch

mindestens 8 Sensoren verwendet werden (Bosch u. a. (2013)). Die Methode erzielt nur verlässliche Ergebnisse, wenn zwischen den Signalverläufen signifikante Unterschiede vorliegen. Mit Sensoren, die eine räumliche Distanz von einigen Metern zueinander aufweisen, können mit dieser Methode gute Ergebnisse erzielt werden (Bosch u. Kleissl (2013)). Vorteil der MCP-Methode ist ihre Robustheit und der geringe notwendige Berechnungsaufwand, der zur Bestimmung der Geschwindigkeitsvektoren notwendig ist (Bosch u. a. (2013)). Zentraler Nachteil sind die lediglich diskreten Richtungsinformationen sowie die große Anzahl an benötigten Sensoren im Vergleich zur Linear-Cloud-Edge-Methode.

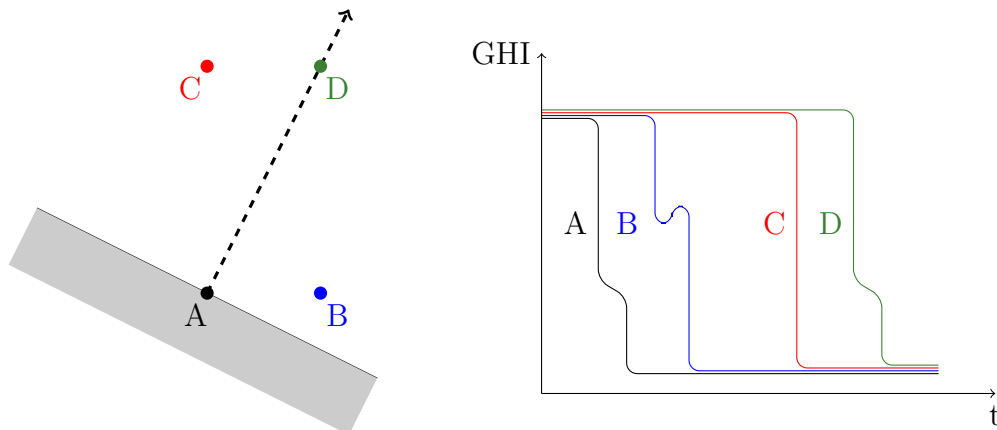


Abbildung 2.1: In der linken Darstellung ist eine Anordnung mit vier Sensoren dargestellt. Die Wolke (grau) verschattet zunächst Sensor A, anschließend Sensor B und C und zuletzt Sensor D. Sensor A und D werden von demselben Punkt auf der Wolkenkante verschattet. In der rechten Abbildung sind mögliche Verläufe der Sensorsignale dargestellt. Da die Sensoren A und D vom gleichen Punkt der Wolkenkante verschattet werden, weisen die zugehörigen Signalverläufe die höchste Ähnlichkeit auf. Die Wolkenzugrichtung ergibt sich unmittelbar aus der Verbindungslinie der beiden Sensoren.

2.2.2 Linear-Cloud-Edge-Methode

Eine Alternative zur MCP-Methode stellt die *Linear-Cloud-Edge*-Methode (LCE) dar, welche erstmals in Bosch u. a. (2013) vorgestellt wird. Mit dieser Methode lassen sich Wolkenbewegungsvektoren mit lediglich drei Einstrahlungssensoren bestimmen, was den technischen Aufwand im Vergleich zur MCP-Methode deutlich vermindert. In Bosch u. Kleissl (2013) wird die Methode für Photovoltaik-Systeme angewendet. Hierbei entfällt die Installation zusätzlicher Sensoren vollständig, da aus den Leistungen einzelner Photovoltaik-Module die solare Einstrahlungsleistung abgeschätzt werden kann. Bei der LCE-Methode werden die drei Sensoren in einer rechtwinkligen Anordnung positioniert. In Bosch u. Kleissl (2013) wird gezeigt, dass die LCE-Methode durch Anpassung der zugrunde liegenden Gleichungen auch bei beliebigen, nicht-rechtwinkligen Sensoranordnungen angewendet werden kann. Die

LCE-Methode basiert auf drei grundlegenden Annahmen: Es wird vorausgesetzt, dass die Wolkenkante einen ideal geraden Verlauf aufweist und die Wolke alle drei Sensoren verschattet. Diese Annahmen sind für einen hinreichend kleinen Abstand der Sensoren von etwa 10 m in den meisten Fällen erfüllt (Lappalainen u. Valkealahti (2016b)). Außerdem wird angenommen, dass sich die Wolke mit einer konstanten Geschwindigkeit über die Sensoranordnung hinwegbewegt. Das Vorgehen der Berechnung der Bewegungsvektoren wird im Folgenden skizziert. In Abbildung 2.2 sind drei Einstrahlungssensoren an den Positionen o , N und E durch rote Punkte symbolisiert. Die Wolke, deren Schatten in grau angedeutet ist, bewegt sich mit der Geschwindigkeit v und unter dem Winkel ϕ . Die Kante der Wolke verläuft unter dem Winkel β . Die Zeit, die die Wolkenkante zum Überstreichen der Strecke $\overline{NC_n}$ benötigt wird mit t_{on} bezeichnet, die Zeit zum Überstreichen der Strecke $\overline{C_eE}$ mit t_{oe} . Der Bewegungsvektor v verläuft parallel zu den Strecken $\overline{NC_n}$ und $\overline{C_eE}$. Der Bewegungsvektor kann in seine einzelnen Richtungskomponenten

$$\begin{pmatrix} v_x \\ v_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v \cos \phi \\ v \sin \phi \end{pmatrix} \quad (2.5)$$

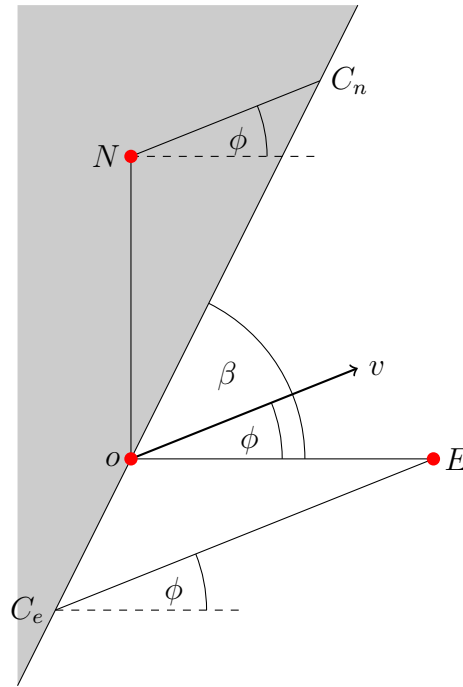


Abbildung 2.2: Dargestellt ist eine Messanordnung bestehend aus drei Sensoren (rot). Mit Hilfe der Linear-Cloud-Edge-Methode können der Geschwindigkeitsbetrag und die Bewegungsrichtung von Wolkenschatten (grau) bestimmt werden. Dazu ist die Detektierung zweier Schattendurchzüge mit einem unterschiedlichen Winkel β jedoch gleichem Bewegungsvektor v notwendig.

zerlegt werden. Die Position der Sensoren sowie die Punkte C_e und C_n können durch die Vektoren

$$\begin{aligned} r_o &= \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} & r_N &= \begin{pmatrix} 0 \\ D \end{pmatrix} & r_E &= \begin{pmatrix} D \\ 0 \end{pmatrix} \\ r_{C_e} &= \begin{pmatrix} C_{ex} \\ C_{ey} \end{pmatrix} \\ r_{C_n} &= \begin{pmatrix} C_{nx} \\ C_{ny} \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (2.6)$$

beschrieben werden, wobei D den Abstand der Sensoren beschreibt. Der Winkel der Wolkenkante β kann durch

$$\tan(\beta) = \frac{C_{ey}}{C_{ex}} = \frac{C_{ny}}{C_{nx}} \quad (2.7)$$

ausgedrückt werden. Die Zeiten t_{on} und t_{oe} können durch die kinematischen Zusammenhänge

$$\begin{aligned} r_E - r_{C_e} &= t_{oe}v \\ r_{C_n} - r_N &= t_{on}v \end{aligned} \quad (2.8)$$

beschrieben werden. Gleichungen 2.5 bis 2.8 können zu

$$\begin{aligned} t_{oe} &= -\frac{D \tan \beta}{v(\sin \phi - \cos \phi \tan \beta)} \\ t_{on} &= -\frac{D}{v(-\sin \phi + \cos \phi \tan \beta)} \end{aligned} \quad (2.9)$$

aufgelöst werden. Durch Eliminieren von β ergibt sich letztlich die Beziehung

$$t_{on} \sin \phi + t_{oe} \cos \phi = D/v \quad (2.10)$$

Die Zeiten t_{on} und t_{oe} werden aus den Zeitversätzen der Signale ermittelt. Als unbekannt verbleiben lediglich die Wolkengeschwindigkeit v und die Wolkenzugrichtung ϕ . Zur Bestimmung des Bewegungsvektors sind daher zwei Messungen mit unterschiedlichem Winkel β notwendig. Werden zwei derartige Wolkendurchzüge detektiert ergibt sich die Wolkenzugrichtung zu

$$\phi = \tan \left(-\frac{t_{oe,2} - t_{oe,1}}{t_{on,2} - t_{on,1}} \right) \quad (2.11)$$

und die Wolkengeschwindigkeit unmittelbar aus den Gleichungen 2.9.

2.3 Systemkomponenten

2.3.1 Ceilometer

Zur Validierung der Höhenmessungen kommt ein Ceilometer vom Typ *CHM 15k NIMBUS* der Firma *G. Lufft Mess- und Regeltechnik GmbH* zum Einsatz. Das Ceilometer verwendet die *lidar*-Technologie (vergleiche Kapitel 2.1). Der Messbereich beträgt 5 m – 15 000 m, wobei eine Auflösung von 5 m erzielt wird. Mit dem Ceilometer können für bis zu 9 Wolkenschichten die Höhen der jeweiligen Wolkenuntergrenzen erfasst werden. Der Laserimpuls wird über einen Zeitraum von 1 – 5 ns ausgesendet und seine Wellenlänge beträgt 1064 nm. Das Sichtfeld, in dem Wolken erfasst werden können, beträgt 0,45 mrad. In Abbildung 2.3 ist für den 13.05.2016 die Intensität des zurückgestreuten Laserimpulses dargestellt. In schwarz sind außerdem die vom Ceilometer berechneten Höhen der Wolkenunterkanten abgebildet.

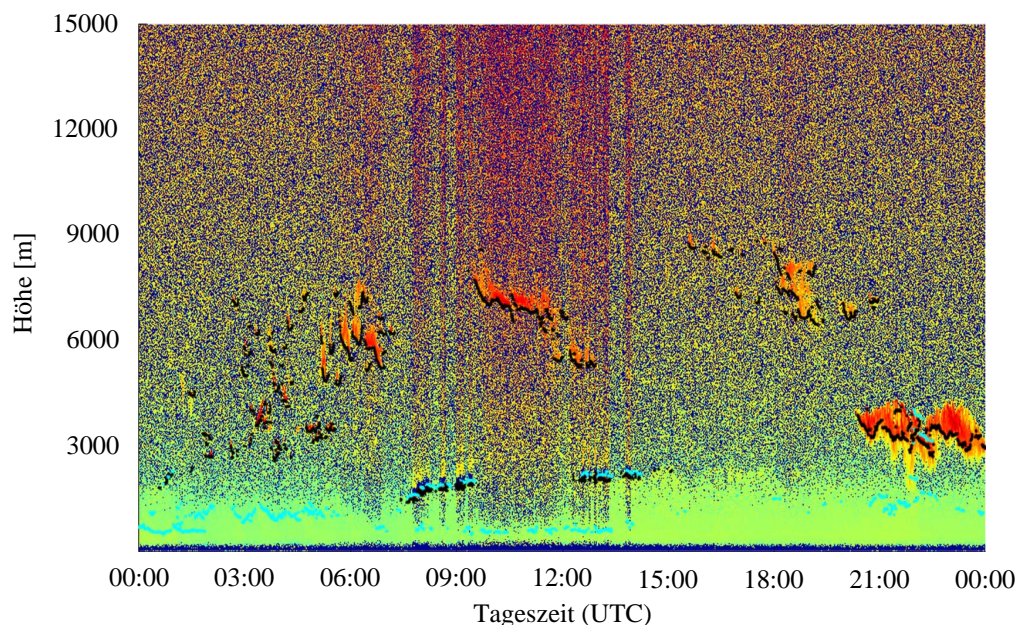


Abbildung 2.3: Dargestellt ist die vom Ceilometer erfasste Intensität des zurückgestreuten Laserimpulses für den 13.05.2016. In schwarz sind die vom Ceilometer berechneten Höhen der Wolkenunterkanten abgebildet, in türkis Aerosolschichten.

2.3.2 Wolkenkamera

Zur Aufnahme der Wolkenkamerabilder kommt in dieser Arbeit eine kommerziell erhältliche, kostengünstige Überwachungskamera zum Einsatz, die mit einem

Fischaugenobjektiv ausgerüstet ist. Es handelt sich um das Modell Q24M der Firma *Mobotix*. Die Kamera nimmt Bilder im Abstand von 30 Sekunden auf. Die Bilder liegen im jpeg-Format vor und weisen eine Auflösung von 2048×1536 Pixel auf. Abbildung 2.4 zeigt ein beispielhaftes Bild der Wolkenkamera. Mit Hilfe des Fischaugenobjektivs kann der gesamte Himmel in einer hemisphärischen Aufnahme erfasst werden. Die Wolkenkamera ist 1,5 Meter vom CSS und 7 Meter vom Ceilometer entfernt installiert.

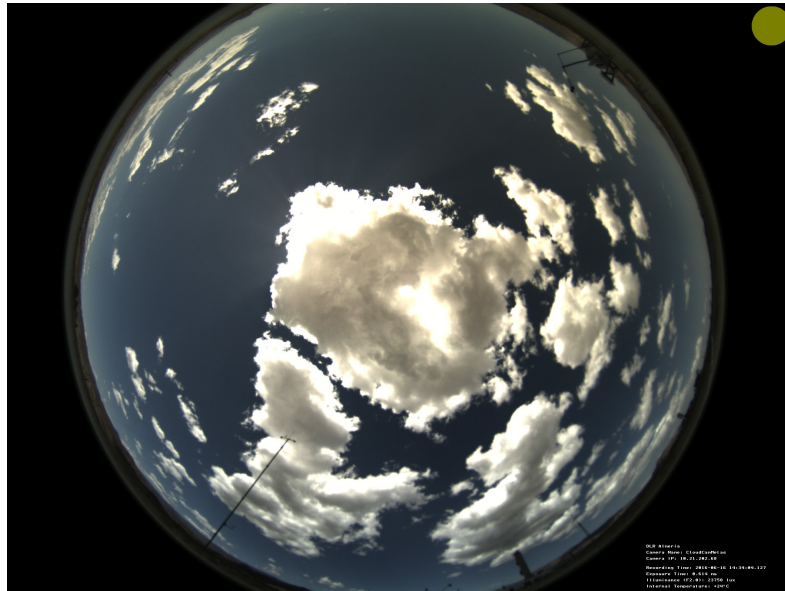


Abbildung 2.4: Dargestellt ist ein beispielhaftes Bild der Wolkenkamera am 16.06.2016 um 14:34 Uhr mit einer Belichtungszeit von 0,6 ms.

2.3.3 Cloud Shadow Speed Sensor

Als alternatives Verfahren zur Bestimmung von Wolkenbewegungsvektoren wurde der *Cloud Shadow Speed Sensor* (CSS) konzipiert und in Fung u. a. (2013) erstmals vorgestellt. Ziel bei der Entwicklung war es, eine kompakte, kostengünstige und robuste Messeinrichtung zu entwerfen, die in der Lage ist Wolkenbewegungsvektoren aus hochfrequenten Messungen der Globalstrahlung zu bestimmen. Die grundlegende Idee unterscheidet sich dabei nicht von den in Abschnitt 2.2 vorgestellten Methoden. Ein entscheidender Unterschied besteht jedoch in den räumlichen Ausmaßen der Messeinrichtung und dem günstigen Herstellungspreis von etwa 400 US-\$ (Wang u. a. (2016)). Abbildung 2.5 zeigt den auf der Plataforma Solar de Almería installierten CSS.

Der CSS besteht aus einem Mikrokontroller mit internem Speicher sowie 9 Phototransistoren. 8 dieser Sensoren sind auf einem Kreisbogen mit einem Öffnungswinkel von 105° und einem Radius von 29,7 cm um einen zentralen Sensor angeordnet. Die



Abbildung 2.5: Abgebildet ist der auf der Plataforma Solar de Almería installierte Cloud Shadow Speed Sensor.

Sensoren haben eine spektrale Empfindlichkeit von etwa 350 bis 1000 nm. Für eine detaillierte technische Beschreibung des CSS sei auf Fung u. a. (2013) verwiesen. Die Sensoren sind nicht photometrisch kalibriert. Dies hat zur Folge, dass die Signale der Sensoren in ihrer Amplitude voneinander abweichen. Da zur Berechnung der Wolkenbewegungsvektoren nur relative Änderungen des Signals relevant sind, hat dies keinen Einfluss auf die Messgenauigkeit. Der CSS zeichnet die Einstrahlungssignale für alle 9 Sensoren auf und speichert diese zunächst in einem internen Speicher. Aufgrund der begrenzten Speicherkapazität können die Daten lediglich über ein Zeitintervall von 9 Sekunden erfasst werden. In den darauffolgenden 9 Sekunden erfolgt die Datenübertragung an den angeschlossenen Messrechner, währenddessen keine neuen Signale aufgezeichnet werden können. Die Messungen erfolgen mit einer Frequenz von 667 s^{-1} . Während eines Messintervalls von 9 Sekunden werden also pro Sensor 6000 Einzelwerte erfasst. Die Sensorsignale eines beispielhaften Messintervalls sind in Abbildung 2.6 dargestellt.

Die an den Messrechner übermittelten Daten werden anschließend ausgewertet. Zwei Sensoren des CSS bilden jeweils ein Sensorpaar. Jedes Sensorpaar besteht aus dem zentralen Sensor und einem der 8 übrigen Sensoren. Zu jedem Sensorpaar wird der maximale Kreuzkorrelationskoeffizient der beiden Signale bestimmt. Auf diese Weise kann die zeitliche Verschiebung der Signale ermittelt werden. Das Vorgehen bei der Berechnung der zeitlichen Signalverschiebung ist in Abbildung 2.7 vereinfacht dargestellt. Die Abbildung zeigt den Verlauf zweier Signale eines Sensorpaars. Die beiden durchgezogenen Linien (Signale A_0 und B_0) stellen den Verlauf der ursprünglich gemessenen Signale dar. Für das betrachtete Intervall kann nun der Kreuzkorrelationskoeffizient

$$R_{AB}(\Delta t) = \frac{1}{n} \sum_{m=1}^n \left(\frac{L_{A,t}(m) - \bar{L}_{A,t}}{\hat{L}_{A,t}} \right) \left(\frac{L_{B,t+\Delta t}(m) - \bar{L}_{B,t+\Delta t}}{\hat{L}_{B,t+\Delta t}} \right) \quad (2.12)$$

berechnet werden. Hierbei stellt n die Anzahl der Messungen innerhalb des Intervalls dar. In diesem vereinfachten Beispiel wird eine Messung pro Sekunde angenommen,

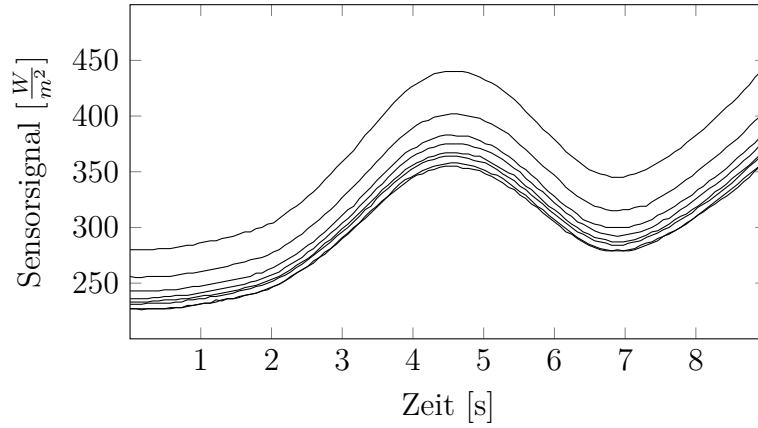


Abbildung 2.6: Dargestellt sind die Einstrahlungssignale der neun Sensoren des CSS für ein beispielhaftes Messintervall. Während der Messdauer von 9 Sekunden werden zu jedem Sensor 6000 Einzelmessungen aufgenommen, was einer Frequenz von 667 s^{-1} entspricht.

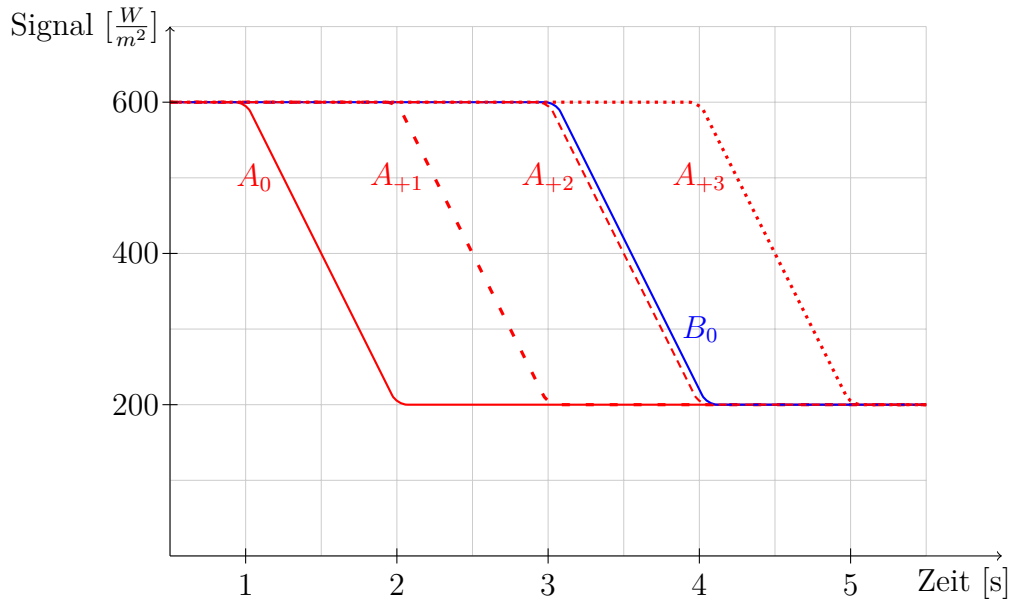


Abbildung 2.7: Dargestellt sind für zwei Sensoren die Signalverläufe A_0 und B_0 . Das Signal A_0 wird nun um diskrete Zeitintervalle verschoben, sodass sich die Verläufe A_{+1} , A_{+2} und A_{+3} ergeben. Für jedes der Signalverläufe wird die Kreuzkorrelation mit dem Signal B_0 bestimmt. Der höchste Kreuzkorrelationskoeffizient wird bei den Signalen A_{+2} und B_0 erzielt. Daraus lässt sich ableiten, dass das Signal A_0 um 2 Sekunden gegenüber dem Signal B_0 verschoben ist.

sodass $n = 5$ gilt. Die Messwerte der beiden Signale werden mit L_A beziehungsweise L_B bezeichnet. \bar{L}_A und \bar{L}_B stellen den arithmetischen Mittelwert und \hat{L}_A sowie \hat{L}_B die Standardabweichung der Signalwerte im Intervall dar. Auf diese Weise ergibt

sich für dieses Beispiel ein Korrelationskoeffizient für die beiden unverschobenen Signale von $R_{AB}(\Delta t = 0 \text{ s}) = 0,41$. Das Signal A_0 wird nun um 1 Sekunde verschoben. Dieses Signal wird mit A_{+1} bezeichnet. Für die Signale A_{+1} und B_0 beträgt der Korrelationskoeffizient $R_{AB}(\Delta t = 1 \text{ s}) = 0,67$. Innerhalb des vorgegebenen Intervalls werden zu jeder möglichen zeitlichen Verschiebung der entsprechende Korrelationskoeffizient berechnet. Die übrigen Korrelationskoeffizienten betragen in diesem Beispiel $R_{AB}(\Delta t = 2 \text{ s}) = 1$ und $R_{AB}(\Delta t = 3 \text{ s}) = 0,61$. Der maximale Korrelationskoeffizient ergibt sich für eine Verschiebung des Signals A um $\Delta t = 2 \text{ s}$. Die beiden Signale weisen bei dieser Verschiebung die größte Ähnlichkeit auf. Übertragen auf den CSS könnte dieses Beispiel eine Wolke beschreiben, die zunächst Sensor A verschattet und 2 Sekunden später Sensor B. Mit der Kreuzkorrelation kann auf diese Weise die zeitliche Differenz ermittelt werden.

Mit den 9 im CSS installierten Sensoren können die Zeitversätze von 8 Sensorpaaren unmittelbar berechnet werden. Aufgrund der gewählten Anordnung ist es darüber hinaus möglich 4 weitere Sensorpaare zu konstruieren, für die eigentlich der Einbau 4 weiterer Sensoren notwendig wäre. Das Vorgehen zur Berechnung der 4 weiteren Sensorpaare kann mit Abbildung 2.8 nachvollzogen werden. Dargestellt sind die 8 auf einem Kreisbogen angeordneten Sensoren S_1 bis S_8 sowie der zentrale Sensor S_0 . Ferner ist die Position der 4 weiteren, im CSS nicht verbauten Sensoren dargestellt. Zur Berechnung des Signalversatzes des Sensorpaars $\{S_0, S_9\}$ können die Signalverläufe der Sensorpaare $\{S_1, S_5\}$ verwendet werden. Dies ist möglich, da die relative Position der Sensoren S_0 und S_9 mit denen der Sensoren S_1 und S_5 übereinstimmt. Sensor S_1 nimmt hierbei die Rolle des zentralen Sensors ein. Zur Bestimmung des Signalversatzes des Sensorpaars $\{S_0, S_{10}\}$ wird das Sensorpaar $\{S_2, S_6\}$ herangezogen. Die Berechnungen der übrigen 2 Sensorpaare erfolgt dementsprechend. Auf diese Weise können die Zeitversätze aller 12 Sensorpaare ermittelt werden. Zur Berechnung der Kreuzkorrelation für alle 12 Sensorpaare werden etwa 1,2 Sekunden benötigt (Intel® Core™ i7-4810MQ-Prozessor, 2,8 GHz).

2.3.4 LCE-Curve-Fitting-Methode

Im CSS sind zwei alternative Methoden zur Bestimmung von Geschwindigkeitsvektoren implementiert. Beide Methoden nutzen das Ergebnis der Kreuzkorrelation für die 12 Sensorpaare. Die erste Methode ist die in Abschnitt 2.2.1 erläuterte Most-Related-Pair-Methode (MCP-Methode). Bei dieser Methode wird zunächst das Sensorpaar mit dem größte Korrelationskoeffizienten identifiziert und auf Basis der beiden zugehörigen Sensoren und ihres zeitlichen Signalversatzes die Geschwindigkeit bestimmt. Aus der Sensorpaarung ergibt sich außerdem unmittelbar die Wolkenzugrichtung. Der CSS hat bei Verwendung der MCP-Methode eine Richtungsauflösung von 15° . Wie in Wang u. a. (2016) diskutiert wird erzielt die MCP-Methode bei der Anwendung im CSS nur schwache Ergebnisse und die Streuung der Geschwindigkeitsbeträge ist enorm. Als Grund hierfür wird der sehr geringe räumliche Abstand

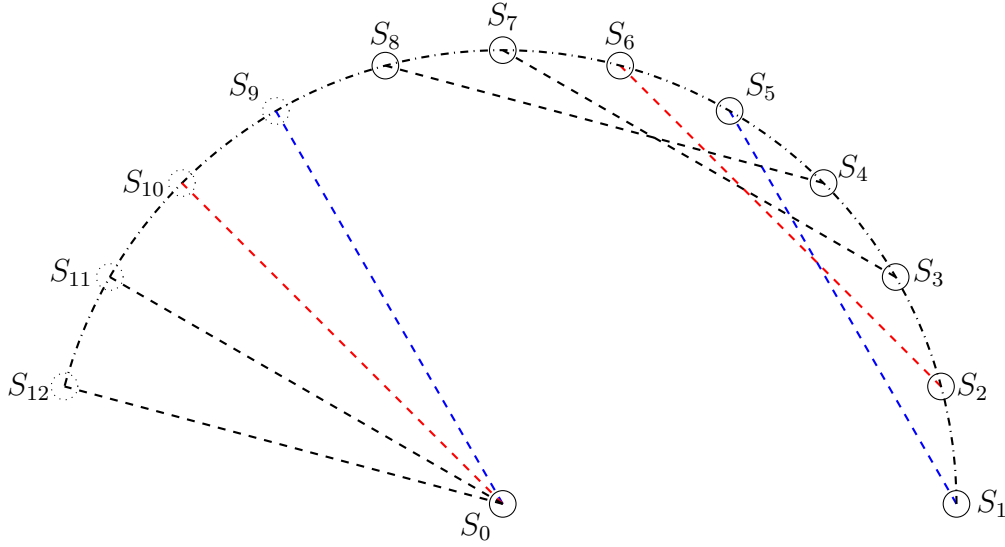


Abbildung 2.8: Dargestellt ist die Sensoranordnung des CSS. Die Sensoren S_0 bis S_8 sind physisch im CSS verbaut. Zur Schattenberechnung werden die Signalabstände zwischen dem zentralen Sensor S_0 und den übrigen Sensoren S_1 bis S_{12} benötigt. Die Signalabstände der Sensorpaare $\{S_0, S_9\}, \{S_0, S_{10}\}, \{S_0, S_{11}\}$ sowie $\{S_0, S_{12}\}$ werden mit Hilfe der Sensorpaare $\{S_1, S_5\}, \{S_2, S_6\}, \{S_3, S_7\}$ beziehungsweise $\{S_4, S_8\}$ konstruiert.

zwischen den Sensoren des CSS angeführt. Über die kleinen Distanzen ist die Wolkenkante nahezu homogen und qualitative Unterschiede der Signalverläufe können mittels der Kreuzkorrelation nicht verlässlich bestimmt werden. Die ursprünglich vorgestellte Implementierung von Fung u. a. (2013) entschärft diese Problematik durch einen nachgeschalteten Medianfilter.

Die zweite im CSS implementierte Methode basiert auf der in Abschnitt 2.2.2 beschriebenen Linear-Cloud-Edge-Methode (LCE-Methode). Sie wurde erstmals in Wang u. a. (2016) unter der Bezeichnung *LCE-Curve-Fitting-Methode* (LCE-CF-Methode) vorgestellt. Die zu Grunde liegende Idee besteht darin, den Bewegungsvektor aus den zeitlichen Signalversätzen *aller* 12 Sensorpaare mit Hilfe der Methode der kleinsten Quadrate zu bestimmen. Bei der MCP-Methode wird im Gegensatz dazu lediglich das Sensorpaar mit dem höchsten Kreuzkorrelationskoeffizienten zur Berechnung des Bewegungsvektors verwendet. Bei der LCE-CF-Methode wird angenommen, dass die Wolkenkante eine homogene Struktur und eine lineare Form über die Ausdehnung der Sensoranordnung aufweist. Das Vorgehen ist in Abbildung 2.9 veranschaulicht. Dargestellt ist die Kante eines Schattens (grau), welcher sich entlang der Verbindungsgeraden der Sensoren S_0 und S_5 mit der Geschwindigkeit v bewegt. Der Abstand der Sensoren S_1 bis S_8 zum zentralen Sensor S_0 wird mit D bezeichnet. Der Winkel ϕ bezeichnet die Wolkenzugrichtung und die Winkel δ_i mit $i = \{1, \dots, 12\}$ bezeichnen die Lage der Sensoren relativ zur Verbindungsline $\overline{S_0 S_1}$.

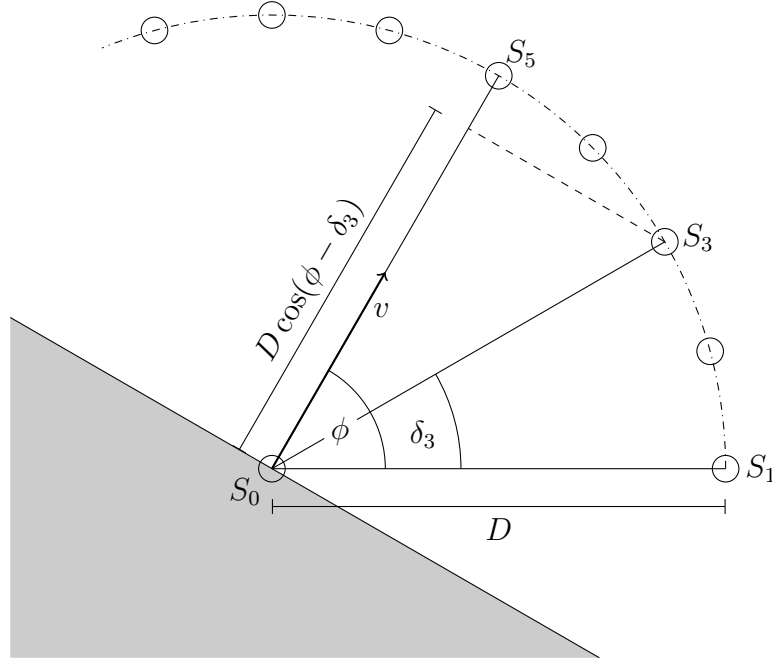


Abbildung 2.9: Dargestellt ist die Kante eines Schattens, welcher sich über die Sensoranordnung des CSS mit der Geschwindigkeit v hinwegbewegt. Die Bewegungsrichtung des Schattens ist durch den Winkel ϕ gegeben. Der Zeitabstand zwischen der Verschattung des Sensors S_0 und den Sensoren S_5 und S_3 beträgt $\frac{D}{v}$ beziehungsweise $\frac{D}{v} \cos(\phi - \delta_3)$.

Ohne Beschränkung der Allgemeinheit wird zur besseren Übersicht für dieses Beispiel angenommen, dass die Wolkenzugrichtung genau entlang der Verbindungsgeraden zweier Sensoren verläuft. Die Zeit, die zwischen der Verschattung des zentralen Sensors S_0 und des Sensors S_i verstreicht, wird mit t_i bezeichnet. Für dieses Beispiel ist augenscheinlich, dass für Sensor S_5

$$t_5 = \frac{D}{v} \quad (2.13)$$

gilt. Außerdem kann für den zeitlichen Signalversatz zwischen dem zentralen Sensor und Sensor S_3

$$t_3 = \frac{D}{v} \cos(\phi - \delta_3) \quad (2.14)$$

über eine Kosinusbeziehung abgeleitet werden. Für die Signalabstände der übrigen Sensorpaare gilt entsprechend

$$t_i = \frac{D}{v} \cos(\phi - \delta_i) \quad \forall i \in \{1, \dots, 12\} \quad (2.15)$$

Mit den vom CSS gemessenen Zeitversätzen t_i der 12 Sensorpaare können insgesamt 12 Gleichungen formuliert werden. Unbekannt sind in diesem Gleichungssystem nur

die Schattengeschwindigkeit v und die Zugrichtung ϕ . Wären die vom CSS bestimmten Zeitversätze t_i exakt, könnte das Gleichungssystem auf Basis zweier beliebiger Gleichungen direkt gelöst werden. In der Praxis unterliegen die vom CSS ermittelten 12 Signalversätze jedoch Unsicherheiten. Das überbestimmte Gleichungssystem wird daher mit Hilfe der Methode der kleinsten Fehlerquadrate gelöst. Dazu wird das Optimierungsproblem

$$\min_{\phi, v} \sum_{i=1}^{12} (t_{i,Fit}(\phi, v) - t_i)^2 \quad (2.16)$$

formuliert, wobei t_i die gemessenen zeitliche Signalversätze darstellen. Der theoretische Zeitversatz $t_{i,Fit}(\phi, v)$ ergibt sich aus der in Gleichung 2.15 hergeleiteten Beziehung zu

$$t_{i,Fit}(\phi, v) = \frac{D}{v} \cos(\phi - \delta_i) \quad \forall i \in \{1, \dots, 12\} \quad (2.17)$$

Ein Beispiel basierend auf realen Messdaten des CSS ist in Abbildung 2.10 dargestellt. In rot sind die mittels Kreuzkorrelation ermittelten Signalversätze der 12 Sensorpaare über ihrem zugehörigen Winkel δ_i eingezeichnet. In Schwarz ist die Lösung der Methode der kleinsten Fehlerquadrate dargestellt. Die berechnete Richtung ist in diesem Beispiel $\phi = 125,78^\circ$, was dem Extremum des Kosinus-Verlaufs entspricht.

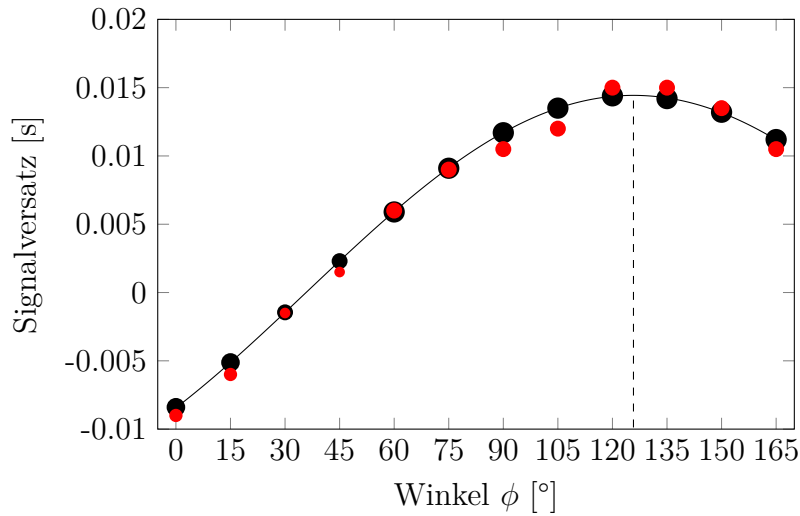


Abbildung 2.10: Dargestellt ist eine beispielhafte Berechnung des Kosinus-Fits basierend auf realen Messdaten des CSS. In rot sind die mittels Kreuzkorrelation ermittelten Signalversätze der 12 Sensorpaare über ihrem zugehörigen Winkel δ_i eingezeichnet. In Schwarz ist die Lösung der Methode der kleinsten Fehlerquadrate dargestellt. Die berechnete Wolkenzugrichtung ist in diesem Beispiel $\phi = 125,78^\circ$, was dem Extremum des Kosinus-Verlaufs entspricht

Das Resultat jeder Berechnung wird dahingehend überprüft, ob es vorgegebenen Gütekriterien standhält. Wird eines der Kriterien verletzt, wird die Berechnung

verworfen. Mit diesem Vorgehen soll sichergestellt werden, dass nur präzise Messungen ausgegeben werden. Abbildung 2.11 zeigt ein beispielhaftes Zeitintervall von einer Stunde, für das 197 Messintervalle aufgezeichnet wurden. Die ausgefüllten Quadrate stellen Berechnungen dar, welche den Qualitätskriterien genügen. Die unausgefüllten Quadrate symbolisieren Berechnungen, welche verworfen werden. Ein Kriterium stellt sicher, dass lediglich Messungen mit einer Geschwindigkeit

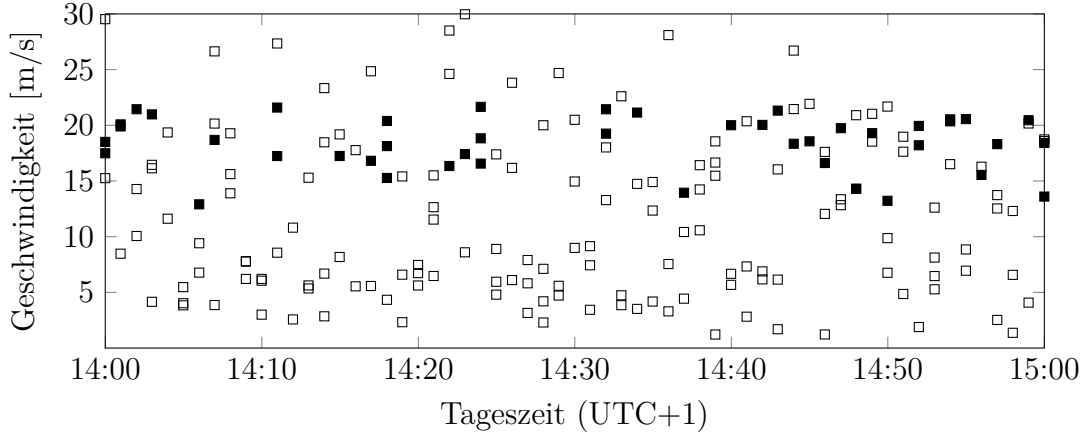


Abbildung 2.11: Für ein Zeitintervall von einer Stunde am 03.06.2016 ist die Auswahl der CSS Messungen gemäß vorgegebenen Gütekriterien dargestellt. Die ausgefüllten Quadrate stellen Berechnungen dar, welche den Qualitätskriterien genügen. Die unausgefüllten Quadrate symbolisieren Berechnungen, welche verworfen werden.

von unter 50 m/s ausgegeben werden. Ein anderes Gütekriterium bewertet den ermittelten Kosinus-Fit. Für die Auswertung wird das Residuum

$$R = \sum_{i=1}^{12} (t_{i,Fit}(\phi, v) - t_i)^2 \quad (2.18)$$

ermittelt, wobei t_i die mittels Kreuzkorrelation bestimmten zeitlichen Signalversatze darstellen und die Parameter ϕ und v die Lösung des in Gleichung 2.16 formulierten Optimierungsproblems darstellen. Mit abnehmender Geschwindigkeit nimmt das Residuum R tendenziell zu. Um den Schwellenwert unabhängig von der Geschwindigkeit definieren zu können, wird das normierte Residuum

$$r = 1 - \frac{R}{t_{RMS}} \quad (2.19)$$

eingeführt, wobei t_{RMS} die quadratische Streuung der Zeitversatze gemäß

$$t_{RMS} = \sum_{i=1}^{12} (t_i - \frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} t_i)^2 \quad (2.20)$$

darstellt.

Die LCE-CF-Methode weist einige Vorteile gegenüber der MCP-Methode auf. Zum einen ist es möglich, die Richtungen in einem kontinuierlichen Spektrum zu bestimmen im Gegensatz zur 15°-großen Richtungsauflösung der MCP-Methode. Zum anderen streuen die Messwerte der LCE-CF-Methode deutlich weniger. Quantitativ kann dies durch die Streuung der Messwerte um den 30-Minuten-Median belegt werden. Bei 5 beliebig ausgewählten Tagen weisen die Messwerte der LCE-CF-Methode eine mittlere quadratische Abweichung von 2,6 m/s auf, die Messwerte der MCP-Methode hingegen eine mittlere quadratische Abweichung von 9,9 m/s.

Die LCE-CF-Methode weist jedoch auch eine bedeutende Schwäche auf. Es wird angenommen, dass die Wolkenzugrichtung und die Wolkenkante senkrecht aufeinander stehen. Dies ist jedoch in der Realität nie exakt erfüllt, was dazu führt, dass die Geschwindigkeit unterschätzt und die berechnete Richtung von der tatsächlichen Bewegungsrichtung abweicht. Dieser Fall ist in Abbildung 2.12 dargestellt. Betrachtet werden zwei unterschiedliche Bewegungsvektoren v_1 und v_2 . Bewegungsvektor v_1 verläuft senkrecht zur Wolkenkante. Zum Zeitpunkt t_0 überstreicht die Kante des Schattens den zentralen Sensor. Zu einem späteren Zeitpunkt t_1 erreicht die Kante den Sensor S_1 . Der Bewegungsvektor v_2 verläuft nicht senkrecht zur Wolkenkante. Der zugehörige Geschwindigkeitsbetrag ist größer, der Anteil der Geschwindigkeit in Richtung der Normalen der Wolkenkante sei jedoch identisch mit dem Geschwindigkeitsbetrag von v_1 , das heißt $v_2^\perp = v_1$. Die Wolkenkante überstreicht zum Zeitpunkt t_0 den zentralen Sensor S_0 und ebenfalls zum Zeitpunkt t_1 den Sensor S_1 . Sämtliche Zeitabstände sind in der Folge in beiden Szenarien identisch. Bei dieser Methode können lediglich *scheinbare* Geschwindigkeiten senkrecht zur Wolkenkante berechnet werden. Im vorgebrachten Beispiel würde die Geschwindigkeit um den Betrag $|v_2| - |v_1| = |v_2| - |\cos(\delta)v_2|$ zu gering berechnet, wobei δ den Winkel zwischen dem Geschwindigkeitsvektor und der Normalen der Wolkenkante bezeichne. Der relative Fehler entspricht folglich $\cos(\delta)$. Wie gut die Annahme der orthogonalen Ausrichtung von Bewegungsvektor und Wolkenkante in der Praxis ist, ist bislang in der Literatur nicht abschließend geklärt. Gemäß dem derzeitigen Stand der Forschung ist diese Annahme zwar für viele Wolkendurchzüge in guter Näherung erfüllt, es werden jedoch auch immer wieder signifikante Abweichungen festgestellt. In Kapitel 3.3 wird die Orthogonalität von Bewegungsvektor und Wolkenkante für einen ausgewählten Beispieltag ausführlich untersucht.

2.4 Bewegungserfassung in Wolkenkamerabildern

Im Rahmen dieser Arbeit werden zur Bestimmung der Wolkenhöhen die Bewegungen von Wolken und Schatten in Kamerabildern ausgewertet. Zur Bewegungserfassung in Bildsequenzen wurden in unterschiedlichen Forschungsbereichen eine Vielzahl von Methoden entwickelt. Im Folgenden werden die beiden wichtigsten Methoden, die *Kreuzkorrelation* und der *Optische Fluss*, vorgestellt.

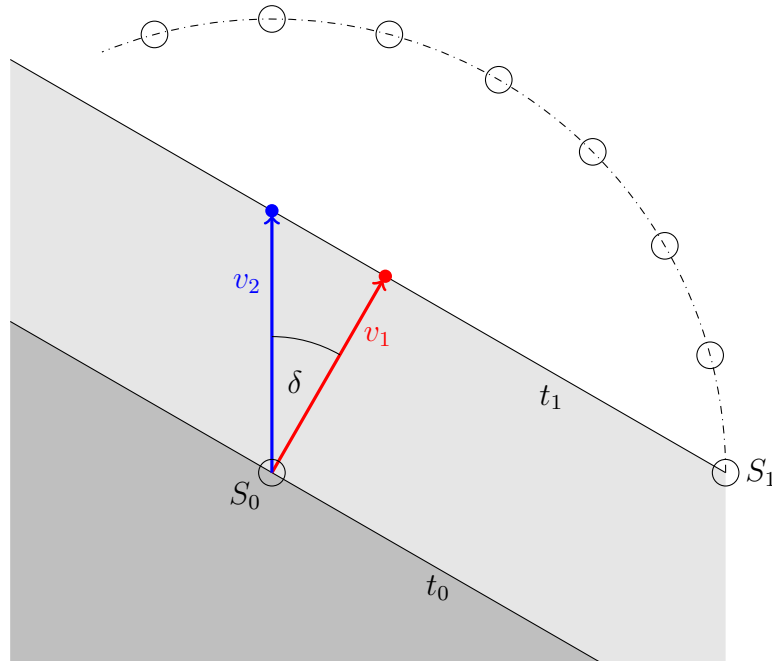


Abbildung 2.12: Dargestellt ist eine Wolkenkante (grau) zu zwei unterschiedlichen Zeitpunkten t_0 und t_1 sowie zwei mögliche Bewegungsvektoren v_1 und v_2 . Bewegungsvektor v_1 verläuft senkrecht zur Wolkenkante. Zum Zeitpunkt t_0 überstreicht die Kante des Schattens den zentralen Sensor S_0 . Zu einem späteren Zeitpunkt t_1 erreicht die Kante den Sensor S_1 . Der Bewegungsvektor v_2 verläuft nicht senkrecht zur Wolkenkante. Der zugehörige Geschwindigkeitsbetrag ist größer, der Anteil der Geschwindigkeit in Richtung der Normalen der Wolkenkante sei jedoch identisch mit dem Geschwindigkeitsbetrag von v_1 . Die Wolkenkante überstreicht zum Zeitpunkt t_0 den zentralen Sensor S_0 und ebenfalls zum Zeitpunkt t_1 den Sensor S_1 . Die Signalverläufe der Sensoren sind für beide Schatten identisch, was sie für den CSS ununterscheidbar macht.

Kreuzkorrelation

Einige der am weitesten verbreiteten Methoden zur Bewegungserfassung basieren auf der Kreuzkorrelation. Mit ihr wird die Ähnlichkeit zweier ein- oder mehrdimensionaler Signale berechnet. Abseits der Bewegungserfassung stellt ein weiteres Anwendungsbeispiel die Analyse der Einstrahlungssignale des CSS dar (vergleiche Kapitel 2.3.3).

Ein Verfahren, das zur Bewegungserfassung mittels Kreuzkorrelation vielfach verwendet wird, ist die *Block-Matching*-Methode. Bei dieser Methode werden stets zwei aufeinanderfolgende Bilder betrachtet. Aus einem dieser Bilder wird ein quadratischer Bildausschnitt f gewählt und mit gleichgroßen Bildausschnitten g des anderen

Bilds verglichen. Dazu wird der Korrelationskoeffizient

$$R_{fg} = \frac{1}{N^2} \sum \frac{(f - \bar{f})(g - \bar{g})}{\sigma_f \sigma_g} \quad (2.21)$$

berechnet, wobei \bar{f} und \bar{g} das arithmetische Mittel, σ_f und σ_g die Standardabweichung und N die Breite des Bildausschnitts in Pixel darstellt. Die Verschiebung ergibt sich aus dem Bildausschnitt g , welcher den höchsten Korrelationskoeffizienten aufweist. Die Methode ist in Abbildung 2.13 beispielhaft anhand zweier entzerrter Wolkenkamerabilder dargestellt. Das obere Bild zeigt die Bewölkungssituation zum Zeitpunkt 11:18:30 Uhr am 03.06.2016. Hellblaue Bereiche stellen Himmel dar, grüne Bereiche Wolken. Das quadratische Wolkenkamerabild hat eine Kantenlänge von 500 Pixel. Im oberen Bild sind 4 beliebig gewählte Bildausschnitte I–IV mit einer Kantenlänge von 80 Pixel dargestellt. Für jedes dieser Bildausschnitte wird mittels Kreuzkorrelation der Bildausschnitt mit der größten Ähnlichkeit im zeitlich folgenden Bild (Zeitpunkt 11:19:00 Uhr) bestimmt. Die Lage dieser Bildausschnitte ist im unteren Bild dargestellt. Schwarz-gestrichelt ist zum Vergleich die ursprüngliche Lage der Bildausschnitte dargestellt. Die Bildausschnitte I und III weisen eine relative Verschiebung von 7 Pixel in x- und 4 Pixel in y-Richtung auf. Bildausschnitt II weist eine Verschiebung von $(6, 3)^T$ und Bildausschnitt IV von $(5, 3)^T$ auf. In Chow u. a. (2011) sowie Peng u. a. (2015) wird die Block-Matching-Methode verwendet, um für zwei Wolkenkamerabilder die Verschiebungen der Wolken zu bestimmen. Um die Genauigkeit des Verfahrens zu erhöhen, wird in Huang u. a. (2012) vorgeschlagen, Bildausschnitte mit unterschiedlichen Größen auszuwählen. Ein zentraler Nachteil der Block-Matching-Methode ist, dass nur Verschiebungen starrer Objekte korrekt ermittelt werden können. Rotation oder Deformierung einzelner Wolkenobjekte können hingegen nicht erfasst werden. Um ebenfalls Änderungen der Wolkenform zu berücksichtigen, wird in Huang u. a. (2013) ein Verfahren vorgestellt, welches mehr als zwei Bilder zur Berechnung der Bewegungsinformation berücksichtigt. Der Bewegungsvektor der Wolken wird dabei aus einer Extrapolation der vorangegangenen Vektoren abgeschätzt.

Neben der Block-Matching-Methode stellt die *Phasenkorrelation* ein weiteres wichtiges Anwendungsfeld der Kreuzkorrelation dar. Bei diesem Verfahren wird die Verschiebung zweier gleichgroßer Bilder bestimmt. Die Berechnung erfolgt mit Hilfe der *Schnellen Fourier-Transformation* und gliedert sich für zwei Bilder f und g in die Schritte:

1. Berechnung der diskreten 2-dimensionalen Fourier-Transformation FFT für beide Bilder mit $F = FFT(f)$ und $G = FFT(g)$
2. Berechnung des Kreuzleistungsspektrums $\Omega = G \times F^*$, wobei F^* die komplex-konjugierte von F darstellt
3. Berechnung der Phasenkorrelationsmatrix $M_{CC} = FFT^{-1}(\Omega)$
4. Ermittlung des Maximums der Phasenkorrelationsmatrix M_{CC}

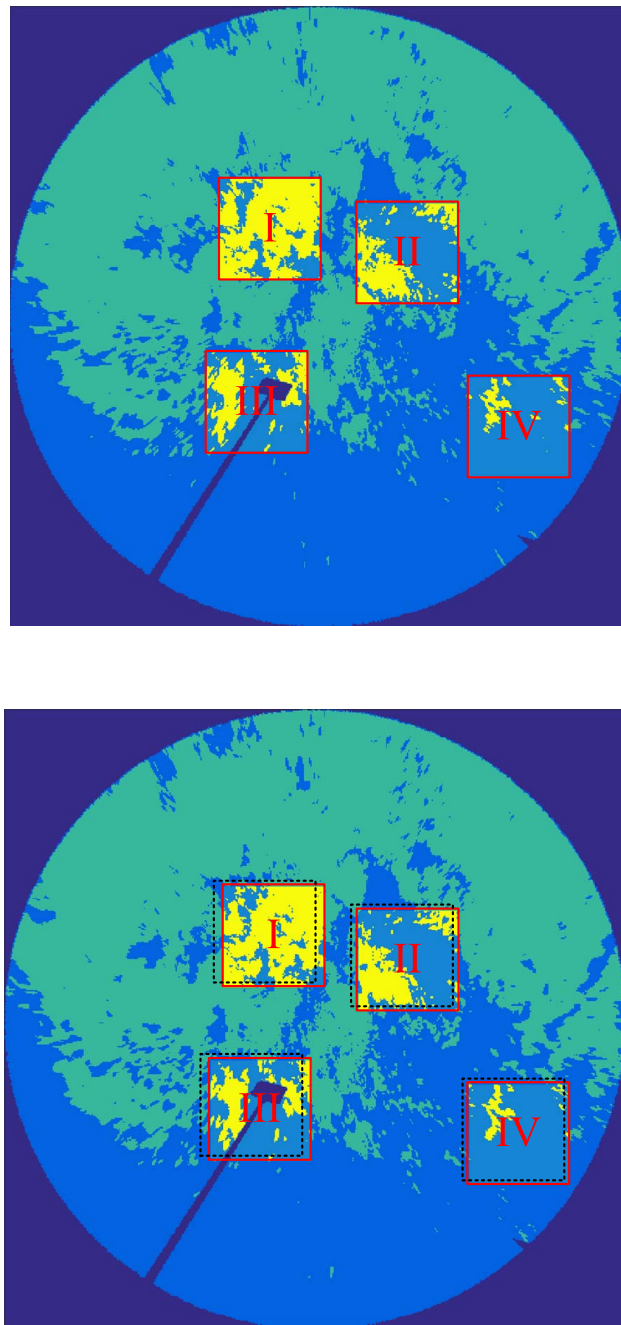


Abbildung 2.13: Dargestellt ist die Block-Matching-Methode anhand zweier entzerrter und segmentierter Wolkenkamerabilder (Zeitpunkt 11:18:30 Uhr und 11:19:00 Uhr). Es werden vier beispielhafte Bildausschnitte I–IV ausgewählt. Im unteren Bild sind in rot die Bildausschnitte dargestellt, welche jeweils die größte Ähnlichkeit zu den Bildausschnitten im oberen Bild aufweisen. Die Lage der Bildausschnitte des oberen Bilds sind im unteren Bild zum Vergleich in schwarz-gestrichelt dargestellt.

Aus dem Ort des Maximums der Phasenkorrelationsmatrix kann unmittelbar die Verschiebung der beiden Bilder abgeleitet werden. Ein Beispiel ist in Abbildung 2.14 dargestellt. Die oberen Bilder zeigen einen Ausschnitt des Wolkenkamerabilds zu den Zeitpunkten 11:18:30 Uhr (links) und 11:19:00 Uhr (rechts). Die ermittelte relative Verschiebung beträgt 7 Pixel in x- und 4 Pixel in y-Richtung. Das Bild unten links zeigt beide Binärbilder überlagert. Gelbe Bereiche repräsentieren überlagerte Wolkenpixel, hellblaue Bereiche überlagerte Himmelspixel. Unten rechts ist die Korrelationsmatrix dargestellt. Gelbe Bereiche zeigen Gebiete hoher Korrelation. Es ist ein eindeutiges Maximum zu erkennen, aus dessen Position (7 Pixel in x-Richtung, und 4 Pixel in y-Richtung relativ zum zentralen Pixel) sich die Verschiebung ergibt. Die Methode der Phasenkorrelation weist Schwächen bei Bildpaaren auf, die starkes Rauschen aufweisen. Ferner können wie bei der Block-Matching-Methode keine Wolkendeformationen oder Rotationen erfasst werden. Ein direkter Vergleich der Block-Matching-Methode mit der Phasenkorrelation findet sich in Huang u. a. (2012). Zentraler Vorteil der Phasenkorrelation ist ihre Robustheit und ihr geringer Berechnungsaufwand (Huang u. a. (2012)).

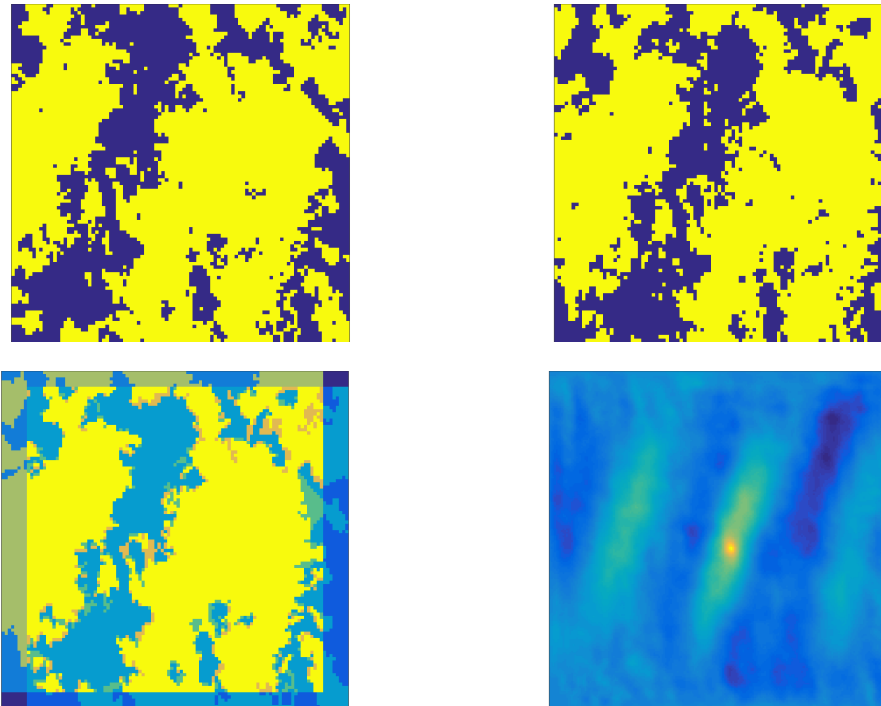


Abbildung 2.14: Die oberen Bilder zeigen einen Ausschnitt der entzerrten und segmentierten Wolkenkamerabilder zu den Zeitpunkten 11:18:30 Uhr (links) und 11:19:00 Uhr (rechts). Das Bild unten links zeigt die Überlagerung beider Binärbilder gemäß der mit der Phasenkorrelation ermittelten Verschiebung. Gelbe Bereiche repräsentieren überlagerte Wolkenpixel, hellblaue Bereiche überlagerte Himmelspixel. Unten rechts ist die Korrelationsmatrix dargestellt. Gelbe Bereiche zeigen Gebiete hoher Korrelation. Aus der Lage des Maximums ergibt sich unmittelbar die Verschiebung.

Optischer Fluss

Eine zweite grundlegende Methodik zur Erfassung von Bewegungen in Bildern entstammt dem Bereich des maschinellen Sehens (engl. *Computer Vision*). Viele der dort verwendeten Methoden zur Objektverfolgung basieren auf sogenannten Optischen-Fluss-Verfahren (engl. *Optical Flow*). Mit Hilfe dieser Technik wird ein dichtes, 2-dimensionales Vektorfeld aus den Bewegungen im Bild erzeugt. Grundsätzlich lässt sich das Konzept des optischen Flusses auch auf Farbbilder anwenden, die nachfolgenden Beziehungen beschränken sich jedoch zur besseren Übersicht auf Grauwertbilder. Die Grundgleichung des optischen Flusses lautet

$$0 = \frac{\partial I}{\partial t} + \frac{\partial I}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial t} + \frac{\partial I}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial t} \quad (2.22)$$

wobei I die Intensität, der erste Summand die zeitliche Ableitung und die letzten beiden Summanden die örtlichen Ableitungen der Intensitäten darstellen. Die Grundgleichung ist an die Kontinuitätsgleichung in der Strömungsmechanik angelehnt. Das resultierende Gleichungssystem ist unterbestimmt, weshalb weitere Beziehungen herangezogen werden müssen. Zur Lösung existieren zwei Ansätze: die *Horn-Schunck-Methode* nach Horn u. Schunck (1981) sowie die *Lucas-Kanade-Methode* nach Lucas u. a. (1981). Bei der Horn-Schunck-Methode resultiert das Vektorfeld aus der Lösung eines globalen Optimierungsproblems. Hierbei wird das globale Energiefunktional

$$E = \int \int \underbrace{[(I_x u + I_y v + I_t)^2]}_{\text{Grundgleichung}} + \underbrace{\alpha^2 (\|\nabla u\|^2 + \|\nabla v\|^2)}_{\text{Glattheitsbedingung}} dx dy \quad (2.23)$$

minimiert. Der erste Term beschreibt in verkürzter Schreibweise die Grundgleichung des optischen Flusses (Gleichung 2.22). Der zweite Term stellt die Glattheitsbedingung dar, welche skaliert durch den Parameter α die Glattheit des Vektorfelds herstellt. Die Glättung des Vektorfelds hat bei der Wolkenbewegungserfassung den Vorteil, dass auch für texturschwache Himmelsbereiche ein Bewegungsvektor auf Basis der angrenzenden bewölkten Bereiche ermittelt werden kann.

Die Lucas-Kanade-Methode beruht neben der Grundgleichung des optischen Flusses (Gleichung 2.22) auf der Annahme der Gleichheit des Flusses in der lokalen Umgebung des betrachteten Pixels. Sowohl der Horn-Schunck- als auch der Lucas-Kanade-Methode liegen folgende zentrale Annahmen zu Grunde: Zum einen wird vorausgesetzt, dass die Intensitätswerte gleicher Objekte in zwei verschiedenen Bildern konstant sind (*brightness constancy*). Dies wird begünstigt durch gleichbleibende Beleuchtungsverhältnisse und Belichtungszeiten. Zum anderen wird davon ausgegangen, dass Verschiebungen von einem Bild zum nächsten gering sind (*temporal persistence*). Insbesondere die zweite Annahme ist für eine Sequenz von Wolkenkamerabildern oftmals nicht erfüllt. Die Zeitabstände zwischen zwei Bildern belaufen sich bei dem in dieser Arbeit verwendeten Bildmaterial auf 30 Sekunden. Zur Berechnung des optischen Flusses dürfen die Verschiebungen je nach Schärfe

der Kanten nur wenige Pixel betragen. Besonders Wolken mit hoher Geschwindigkeit und geringer Höhe weisen jedoch deutlich größere Verschiebungen auf. In diesem Fall kann der optische Fluss durch die Anwendung hierarchischer Verfahren, wie beispielsweise der *Gauß'schen Pyramide* bestimmt werden. Dazu wird zunächst die Auflösung der Bilder vermindert und der optische Fluss auf einer groben Skala berechnet. Anschließend wird das Vektorfeld auf immer feineren Skalen präzisiert. Dieser Ansatz hat einen erhöhten Berechnungsaufwand zur Folge. Bei der Lucas-Kanade-Methode ist die Annahme kleiner Verschiebungen besonders relevant. In Wood-Bradley u. a. (2012) werden die Wolkenbewegungen in Kamerabildern mit Hilfe der Lucas-Kanade-Methode erfasst. Der zeitliche Abstand zweier Bildpaare beträgt bei dieser Untersuchung 1 Sekunde. In Chow u. a. (2015) wird die Horn-Schunck-Methode verwendet, um Wolkenbewegungen zu erfassen. Die Analyse basiert auf Wolkenkamerabildern mit einem Abstand von 30 Sekunden. Aufgrund des großen Zeitintervalls zwischen zwei Bildern wird ein hierarchischer Ansatz angewendet, welcher in einem System aus Euler-Lagrange-Gleichungen resultiert und durch Überrelaxationsverfahren numerisch gelöst wird.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Methode des optischen Flusses vor allem bei geringen Verschiebungen von wenigen Pixeln Anwendung findet. Wolkenverschiebungen können dabei sehr detailliert aufgelöst und auch mögliche Deformationen können exakt erfasst werden (Wood-Bradley u. a. (2012)). Die auf Kreuzkorrelation beruhenden Verfahren bieten den Vorteil einer einfachen, robusten und effizienten Berechnung.

3 Datenauswertung und Verbesserung des Cloud Shadow Speed Sensors

3.1 Datenauswertung

Seit Mitte März 2016 ist auf der Plataforma Solar de Almería ein Cloud Shadow Speed Sensor (CSS) installiert. Der Sensor hat sich in seinem ersten Betriebsjahr als wartungsarm und robust erwiesen: Während dieser Zeit kam es lediglich zu einem einzelnen Ausfall, welcher jedoch ursächlich nicht auf den CSS zurückzuführen ist. Die vom CSS abgespeicherten Daten umfassen neben den prozessierten Geschwindigkeits- und Richtungsinformationen der detektierten Wolken ebenfalls die hochfrequenten Einstrahlungsmessungen aller 9 Sensoren. Durch die Synchronisierung des CSS mit einem ntp-Server werden die Daten ab dem 18.10.2016 mit einer zeitlichen Genauigkeit von ± 1 Sekunde erfasst. Ältere Daten unterliegen einer nicht genau bekannten zeitlichen Unsicherheit von etwa ± 1 Minute. Abweichungen dieser Größenordnung wurden durch Einzelprüfungen mit Hilfe einer Wolkenkamera, die mit einem ntp-Server synchronisiert wird, ermittelt. Die zeitliche Unsicherheit hat keinen Einfluss auf die berechneten Bewegungsvektoren (Geschwindigkeitsbetrag und Richtung), sondern lediglich auf den hinterlegten Zeitpunkt der Messung.

Das nachfolgende Kapitel gliedert sich wie folgt: In Abschnitt 3.1.1 wird ein Algorithmus vorgestellt, mit der Verschattungsereignisse durch Wolken identifiziert und charakterisiert werden können. Die Auswertung der Ergebnisse erfolgt in Abschnitt 3.1.2. Bei der Analyse wird ebenfalls der Frage nachgegangen, inwiefern die von diesem Algorithmus identifizierten Verschattungen mit denen vom CSS ermittelten Verschattungsereignissen übereinstimmen. In Abschnitt 3.2 wird ein verbesserter Algorithmus zur Bestimmung von Bewegungsvektoren für den CSS ausgearbeitet. In Abschnitt 3.3 wird der Frage nachgegangen, inwieweit die grundlegende Annahme der Orthogonalität von Wolkenkante und Bewegungsrichtung der Wolke für CSS-Messungen zutrifft.

3.1.1 Algorithmus zur Identifizierung von Verschattungsereignissen

Die vom CSS ermittelten Daten umfassen hochaufgelöste Einstrahlungsmessungen, welche in Messintervallen zu je 9 Sekunden aufgenommen werden. In jedem Messintervall liegen zu jedem der 9 Sensoren 6000 Einzelmessungen vor. Zwischen den Messintervallen erfolgt die Datenübertragung an den angeschlossenen Messrechner, welche ebenfalls etwa 9 Sekunden andauert. Währenddessen erfolgen keine neuen Messungen. Zur Auswertung der Einstrahlungsdaten werden in einem ersten Schritt die Intervalle, in denen keine Daten vorliegen, durch lineare Interpolation approximiert. Innerhalb der Messintervalle werden außerdem die hochfrequenten Messdaten von einer Frequenz von 667 s^{-1} auf eine Frequenz von 1 s^{-1} heruntergetaktet. Das resultierende Signal besteht aus diskreten Messungen mit konstanten zeitlichen Abständen von 1 Sekunde. Das Vorgehen ist in Abbildung 3.1 beispielhaft gezeigt. In rot dargestellt ist das hochfrequente Messsignal des CSS, in schwarz dargestellt ist das heruntergetaktete und linear interpolierte diskrete Messsignal. Der Wechsel

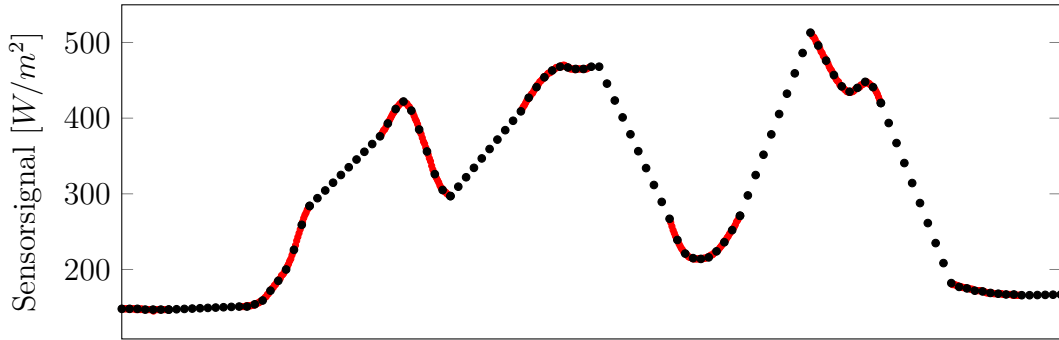


Abbildung 3.1: In rot dargestellt ist das hochfrequente Sensorsignal des CSS. Zwischen den Messintervallen wird das Signal linear interpoliert. Innerhalb der Messintervalle wird das Signal auf eine Frequenz von 1 s^{-1} heruntergetaktet. Dargestellt ist der Zeitraum von 12:51 Uhr bis 12:53 Uhr am 20.03.2016.

zwischen Zeitpunkten, an denen der Sensor direkt von der Sonne beschienen wird, und Zeitpunkten, an denen der Sensor durch eine Wolke verschattet wird, wird im Folgenden als *Verschattungsereignis* bezeichnet. Zur Identifizierung solcher Verschattungsereignisse ist es notwendig, zwischen einer bewölkten und einer unbewölkten Einstrahlungssituation differenzieren zu können. Diese Unterscheidung wird mit Hilfe der Einstrahlungsleistung definiert, welche bei einem wolkenlosen Himmel vorläge (engl. *clear sky irradiance*). Es wird daher für jeden beliebigen Zeitpunkt ein Clear-Sky-Wert für die *horizontale Globalstrahlung* (GHI) abgeschätzt (Hanrieder u. a. (2016)). Hierfür wird eine Beschreibung der GHI nach Ineichen u. Perez (2002) verwendet, welche auf dem Elevationswinkel γ , der *Linken Trübung* T_L und der optischen Luftmasse AM (engl. *air mass*) beruht:

$$\text{GHI} = a_1 I_0 \sin(\gamma) \exp(-a_2 AM(f_1 + f_2 - (T_L - 1))) \quad (3.1)$$

Hierbei stellt I_0 die Solarkonstante dar und die Faktoren a_1 , a_2 , f_1 und f_2 sind Funktionen der Höhe über Meeresspiegel. Der Verlauf der GHI des Clear-Sky-Forecasts ist in Abbildung 3.2 beispielhaft zusammen mit dem Sensorsignal des CSS für den 16.05.2016 dargestellt. Für diesen Tag herrscht zwischen 09:00 und 10:30 Uhr ein nahezu wolkenloser Himmel. Trotzdem können zu diesen Zeitpunkten signifikante Abweichungen des Sensorsignals (schwarz) und der GHI des Clear-Sky-Forecasts (rot) festgestellt werden. Grund für die Abweichung ist, dass es sich bei den Sensoren des CSS um einfache Photodioden handelt und ihr unkalibriertes Signal nicht mit GHI-Messungen übereinstimmen. Daneben existieren weitere Einflussfaktoren, die zu einer Abweichung zwischen der GHI des Clear-Sky-Forecasts und dem Sensorsignal des CSS führen: Der zeitliche Gradient des Signals ist in den Morgen- und Abendstunden größer als dies vom Clear-Sky-Forecast-Modell vorhergesagt wird. Der Grund hierfür wird in der Einbaulage der Photodioden im CSS vermutet. Außerdem können Verunreinigungen der Einstrahlungssensoren des CSS oder Regentropfen zu Abweichungen führen. Die berechneten Clear-Sky-GHI-Werte

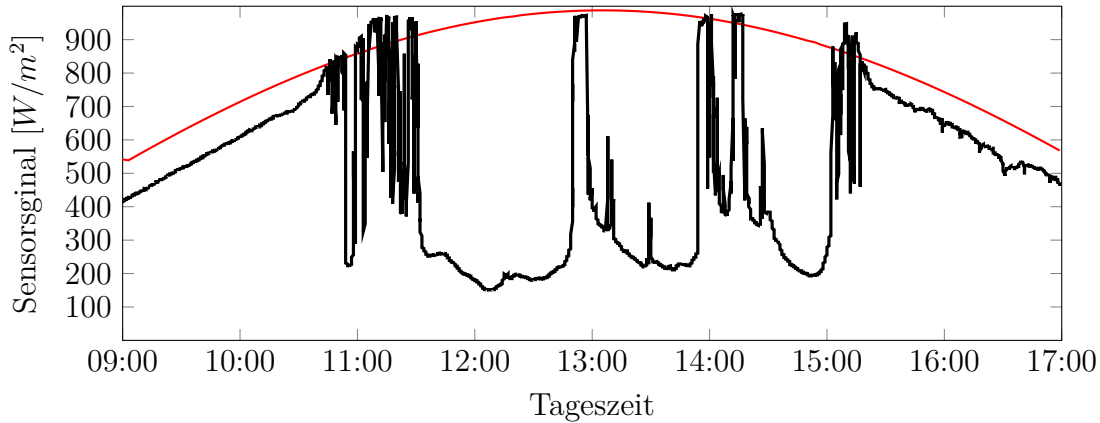


Abbildung 3.2: Vergleich des berechneten Clear-Sky-Globalstrahlung in rot mit dem aufgezeichneten Einstrahlungssignal eines Sensors des CSS in schwarz für den 16.05.2016.

werden daher so korrigiert, dass sie zum Sensorsignal des CSS passen. Um den Clear-Sky-Forecast anzugleichen, wird dieser um einen zeitlich variablen Faktor korrigiert. Basierend auf den Einstrahlungsdaten des CSS werden dazu Zeitintervalle automatisiert identifiziert, während derer mit hoher Wahrscheinlichkeit eine nahezu wolkenlose Einstrahlungssituation vorliegt. Zur Differenzierung zwischen wolkenlosem und bewölktem Himmel wird der Verlauf des Sensorsignals mit der Clear-Sky-Schwellenwert-Methode (engl. *clear-sky irradiance thresholding method*) nach Reno u. a. (2012) ausgewertet. In dieser Methodik werden 5 Kriterien definiert und für jedes Kriterium wird ein eigener Schwellenwert festgelegt. Sowohl für den Clear-Sky-Forecast als auch für das Messsignal werden für ein gleitendes Zeitintervall von 10 Minuten

1. das arithmetische Mittel der GHI,
2. der Maximalwert der GHI,

3. die Länge der Verbindungslinie zwischen allen Messpunkten,

$$L = \sum_{i=1}^n \sqrt{(GHI_{i+1} - GHI_i)^2 + (t_{i+1} - t_i)^2} \quad (3.2)$$

wobei GHI den Messwert bezeichnet und t den zugehörigen Zeitpunkt

4. die Standardabweichung der GHI Änderungen zwischen zwei Zeitschritten

$$\sigma_{\Delta GHI} = \sqrt{\sum_{i=1}^{n-1} (k_i - \bar{k})^2} \quad (3.3)$$

wobei $k_i = GHI_{i+1} - GHI_i$ und \bar{k} den Mittelwert bezeichnet sowie

5. die maximale Abweichung der Differenz der Steigungen

$$\Delta S = \max \left(\left| (GHI_{i+1} - GHI_i) - (GHI_{i+1}^{CSF} - GHI_i^{CSF}) \right| \right) \quad (3.4)$$

wobei GHI_i^{CSF} den GHI-Wert des Clear-Sky-Forecasts bezeichnet,

berechnet (Chu u. a. (2014)). Anschließend werden die Differenzen der 5 berechneten Kenngrößen zwischen dem Clear-Sky-Forecast und dem Messsignal ermittelt und mit einem definierten Schwellenwert verglichen. Liegen alle 5 Differenzwerte unterhalb des jeweiligen Schwellenwerts, wird für das Zeitintervall eine wolkenlose Einstrahlungssituation angenommen. Aufgrund der fehlenden Kalibration der Sensoren und der daraus folgenden erheblichen Differenzen zwischen dem Clear-Sky-Forecast und dem gemessenen Signal, werden die Schwellenwerte der ersten beiden Kriterien verhältnismäßig weit gefasst. Wenn ein 10-Minuten-Zeitintervall als wolkenlos identifiziert wird, wird zu diesem die mittlere relative Abweichung des GHI-Signals des Clear-Sky-Forecasts GHI_i^{CSF} und des Sensorsignals L_i^{CSS}

$$K_{CSF} = \frac{\sum_{i=1}^m L_i^{CSS}}{\sum_{i=1}^m GHI_i^{CSF}} \quad (3.5)$$

berechnet. Der Korrekturfaktor K_{CSF} wird für alle zukünftigen Zeitpunkte dieses Tages verwendet bis ein neues Zeitintervall als wolkenlos identifiziert wird und ein neuer Korrekturfaktor bestimmt werden kann. Die Clear-Sky-Schwellenwert-Methode nach Reno u. a. (2012) stellt sich als robust heraus und findet genügend viele Zeitintervalle mit einer wolkenlosen Einstrahlungssituation, um eine gute Übereinstimmung zwischen der korrigierten GHI des Clear-Sky-Forecasts und dem Messsignal zu erzielen. In Abbildung 3.3 ist für den 16.05.2016 die korrigierte GHI des Clear-Sky-Forecasts in rot dargestellt. Fett hervorgehoben sind Zeitpunkte, an denen die Schwellenwert-Methode ein wolkenloses 10-Minuten-Intervall identifiziert. Zu diesen Zeitpunkten wird der Clear-Sky-Forecast durch einen konstanten Faktor an die Einstrahlungsmessung angepasst. Der schwarze Verlauf zeigt das Sensorsignal. Unmittelbar vor und nach einem Leistungseinbruch steigt das Einstrahlungssignal für

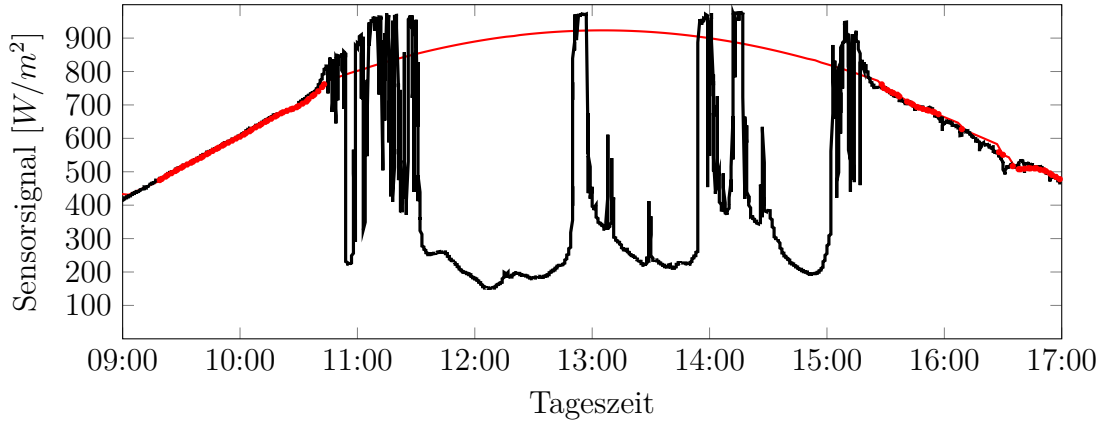


Abbildung 3.3: Vergleich des an das Sensorsignal angepassten Clear-Sky-Forecasts in rot mit der gemessenen Globalstrahlung in schwarz für den 16.05.2016. Fett hervorgehoben sind Zeitpunkte, zu denen ein Zeitintervall mit wolkenloser Einstrahlungssituation identifiziert wird.

kurze Zeit über den Wert des Clear-Sky-Forecasts. Diese Einstrahlungsüberhöhungen resultieren aus additiven Strahlungseinträgen durch Reflexionen an Kanten von Kumuluswolken (Zehner u. a. (2012)).

Als Maß für die Intensität einer Verschattung wird in der Literatur die Schattenstärke (engl. *shading strengths*) eingeführt, welche nach Mäki u. Valkealahti (2012) zu

$$SS = \frac{GHI^{CSF} - GHI}{GHI^{CSF}} \quad (3.6)$$

definiert ist. Hierbei entspricht GHI der gemessenen Einstrahlung und GHI^{CSF} der Einstrahlung im unverschatteten Zustand. Diese Definition wird für die nachfolgenden Betrachtungen übernommen, wobei die GHI im unverschatteten Zustand durch die korrigierte GHI des Clear-Sky-Forecasts und die GHI im verschatteten Zustand durch das Sensorsignal ersetzt wird. Eine andere weit verbreitete Kenngröße ist der Clear-Sky-Index (Perez u. a. (2011), Marquez u. a. (2013)). Dieser ist zu

$$k_{GHI} = \frac{GHI}{GHI^{CSF}} \quad (3.7)$$

definiert, wobei auch hier GHI einer gemessenen Einstrahlung entspricht und GHI^{CSF} der Einstrahlung bei wolkenlosem Himmel. Beide Größen lassen sich durch

$$SS = \frac{GHI^{CSF} - GHI}{GHI^{CSF}} = 1 - \frac{GHI}{GHI^{CSF}} = 1 - k_{GHI} \quad (3.8)$$

ineinander überführen. Zur Differenzierung zwischen Zeitpunkten, an denen eine Wolke den Sensor verschattet und an denen der Sensor unverschattet ist, wird eine Schattenstärke von 10 % als Differenzierungsmerkmal eingeführt. Beträgt die Schattenstärke weniger als 10 % gilt der Sensor als unverschattet. Liegt die

Schattenstärke darüber, gilt er als verschattet. In der Praxis kann nicht eindeutig zwischen einem verschatteten und einem unverschatteten Zustand differenziert werden. Vielmehr existieren unendlich viele Abstufungen und für jede technische Anwendung müssen eigene Schwellenwert definiert werden, um derartige Zustände zu unterscheiden. Für Photovoltaik-Kraftwerke beispielsweise haben nach Lappalainen u. Valkealahti (2015) Verschattungen mit einer Schattenstärke von weniger als 40 % keine signifikanten Auswirkungen auf den Betrieb.

Der beschriebene Algorithmus zur Detektierung von Verschattungen ist in Abbildung 3.4 an einem Beispiel veranschaulicht. In rot ist die korrigierte GHI des Clear-Sky-Forecasts dargestellt. Der schwarze Signalverlauf stellt das Sensorsignal dar. Eingezeichnet ist ferner der gewählte Schwellenwert der Schattenstärke von 10 %. Für den dargestellten Signalverlauf würden zwei Verschattungen detektiert. Zur Berechnung der Schattenstärke wird der minimale Signalwert während der Verschattung verwendet. Im dargestellten Beispiel sind dies $GHI_{min,I}$ und $GHI_{min,II}$. Die Dauer der beiden Verschattungen betragen in diesem Beispiel t_I beziehungsweise t_{II} . In Abbildung 3.5 ist in schwarz der Verlauf eines Sensorsignals zwischen 14:00 und 15:00 Uhr am 16.06.2016 dargestellt. In rot dargestellt ist die korrigierte GHI des Clear-Sky-Forecasts. Gestrichelt dargestellt ist außerdem der 90 %-Schwellenwert. Für den dargestellten Zeitraum werden 10 Verschattungen identifiziert. Vier dieser Verschattungen dauern weniger als 5 Sekunden an. Jeweils zwei dieser Verschattungen sind in der Abbildung blau umkreist. Die Schattenstärken dieser Verschattungen betragen weniger als 12 % und liegen damit nur geringfügig oberhalb des Schwellenwerts. Die Verschattungen IV und V dauern weniger als 1 Minute an. Ihre Schattenstärken betragen 50 % beziehungsweise 42 %. Die übrigen 4 Verschattungen dauern länger an. Ihre Dauer reicht von 90 Sekunden (Verschattung II) bis über 6 Minuten (Verschattung III). Verschattung I besitzt mit 82 % die größte Schattenstärke.

3.1.2 Auswertung und Ergebnisse

Zur Berechnung der Verschattungsereignisse wird das Sensorsignal *eines* der neun im CSS installierten Einstrahlungssensoren verwendet. Die Signale der Sensoren weisen zwar signifikante Unterschiede auf, jedoch ist die relative Abweichung etwa konstant. In Abbildung 3.6 sind für 50.287 Messintervalle an 31 Tage die relative Abweichung des Signals in Bezug zum Sensorsignal des zentralen Sensors dargestellt. Die relative Abweichung aller Sensoren streut jeweils in einem engen Band von etwa 5 %. Größere relative Abweichung werden bei 3 der 8 Sensoren beobachtet. Da nur relative Abweichungen bei der Analyse relevant sind, können unabhängig von der Sensorwahl die gleichen Ergebnisse erzielt werden.

Ausgewertet wird der Zeitraum vom 20. März bis 28. Oktober 2016 (223 Tage) jeweils von 09:00 bis 17:00 Uhr. Zu jeder Verschattung wird der Beginn (Unterschreiten des 90%-Schwellenwerts) und das Ende (Überschreiten des 90%-Schwellenwerts), die

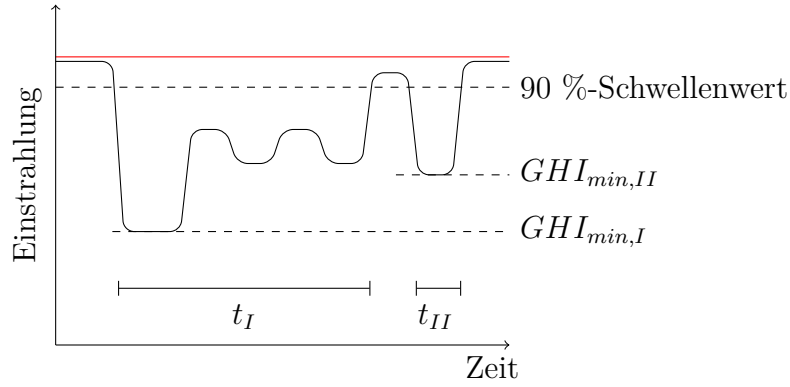


Abbildung 3.4: Dargestellt ist in schwarz ein möglicher Verlauf des Sensorsignals sowie in rot der Verlauf der korrigierten GHI des Clear-Sky-Forecast. Sinkt das Signal unter 90 % des Clear-Sky-Werts ab, stellt dies den Beginn einer Verschattung dar. Dies entspricht einer Schattenstärke von 10 %. Steigt das Signal über 90 % des Clear-Sky-Werts, markiert dies das Ende der Verschattung. Im dargestellten Verlauf werden zwei Verschattungen detektiert. Ferner sind die zugehörigen Verschattungsdauern t_I und t_{II} sowie die zugehörigen minimalen Signalwerte während der Verschattung $GHI_{min,I}$ und $GHI_{min,II}$ dargestellt. Letztere werden zur Berechnung der Schattenstärke verwendet.

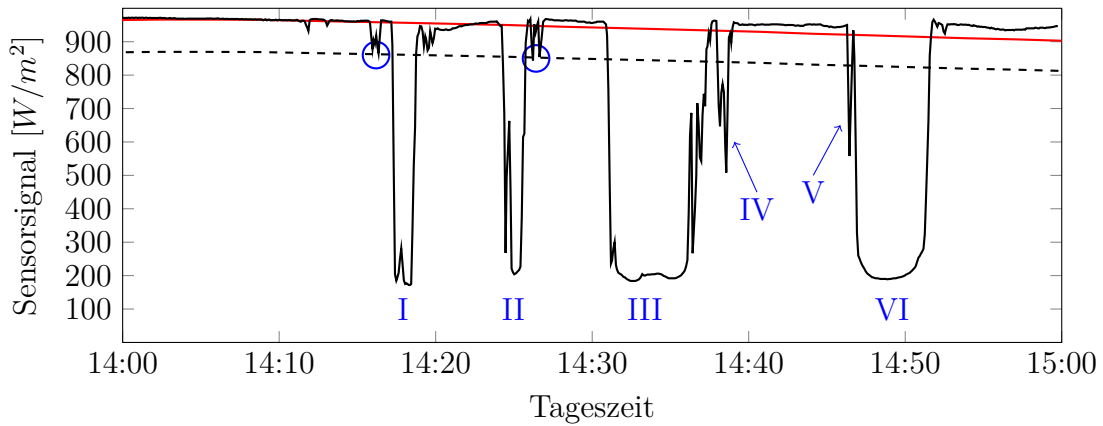


Abbildung 3.5: Dargestellt ist das Sensorsignal zwischen 14:00 und 15:00 Uhr am 16.06.2016. Rot dargestellt ist die korrigierte GHI des Clear-Sky-Forecasts, gestrichelt der 90 %-Schwellenwert. Es werden 10 Verschattungen detektiert. Vier dieser Verschattungen dauern weniger als 5 Sekunden an und sind in der Abbildung blau umkreist. Die übrigen Verschattungen (I bis VI) dauern deutlich länger an. Die längste Verschattung ist mit über 6 Minuten Verschattung III. Verschattung I besitzt mit 82 % die größte Schattenstärke.

daraus resultierende Verschattungsdauer sowie der minimale Signalwert während des Verschattungszeitraums erfasst. Insgesamt werden 8276 Verschattungsereignisse detektiert. Dies entspricht einem arithmetischen Mittel von 37,1 Verschattungen pro

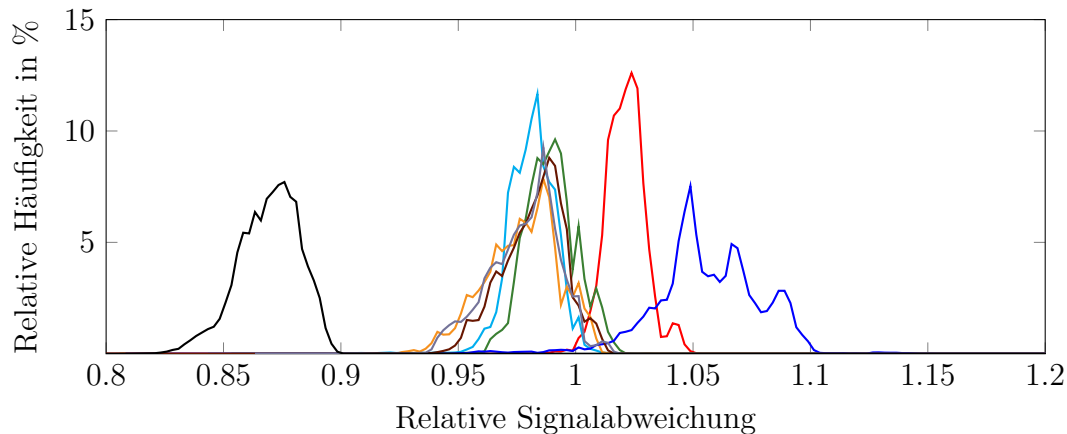


Abbildung 3.6: Dargestellt ist die relative Abweichung der 8 Sensorsignale bezogen auf das Signal des zentralen Sensors. Die Auswertung basiert auf 50.287 Messintervallen, deren Ergebnis in Klassen mit einer Breite von 0,005 subsumiert sind.

Tag und einem Median von 25,0 Verschattungen pro Tag. An 66 Tagen herrscht eine wolkenlose oder durchgehend bedeckte Himmelssituation (weniger als zwei Verschattungen). Für den 03.06.2016 werden die meisten Verschattungen (432) ermittelt, was einem zeitlichen Mittel von 54 Verschattungen pro Stunde entspricht. Die Häufigkeitsverteilung der Verschattungsdauer für den Bereich von bis zu 100 Sekunden ist in Abbildung 3.7 dargestellt. Es lässt sich ein hyperbolischer Verlauf erkennen, der für die minimale Verschattungsdauer von einer Sekunde das Maximum von 498 Messungen erreicht. Mit steigender Verschattungsdauer sinkt die Anzahl der detektierten Verschattungsereignisse ab und der Verlauf nähert sich asymptotisch der horizontalen Achse. Als zweite wichtige Kenngröße ist in Abbildung 3.8 die Häufigkeitsverteilung der Schattenstärke im Bereich von 10 % bis 100 % dargestellt. Da gemäß der gewählten Methode Zeitpunkte mit einer Schattenstärke von weniger als 10 % als wolkenlos angesehen werden, existieren keine Verschattungen mit einer Schattenstärke unterhalb dieses Schwellenwerts. Das Maximum des Verlaufs wird erwartungsgemäß bei einer Schattenstärke von 10 % erreicht (1014 Verschattungen). Mit zunehmender Schattenstärke fällt der Verlauf zunächst etwa asymptotisch ab. Bei einer Schattenstärke von etwa 30 % wird ein Plateau erreicht. Der Anteil der Verschattungen mit einer Schattenstärke von unter 30 % beträgt 63,2 %. Die Anzahl der detektierten Verschattungen ist im Bereich von 30 % bis 55 % etwa konstant. Für Schattenstärken von über 55 % fällt der Verlauf etwa linear ab und erreicht bei etwa 85 % nahezu das Nullniveau. Der Anteil der Verschattungen mit einer Schattenstärke von über 85 % beträgt 0,35 %. Das arithmetische Mittel der Schattenstärke beträgt 29,8 %. In der Literatur finden sich vergleichbare Untersuchungen zur Charakterisierung von Verschattungen. In Lappalainen u. Valkealahti (2016a) werden für einen Zeitraum von 4 Jahren an 457 ausgewählten Tagen, an denen gute Einstrahlungsbedingungen für Photovoltaik-Systeme vorherrschten, Verschattungen

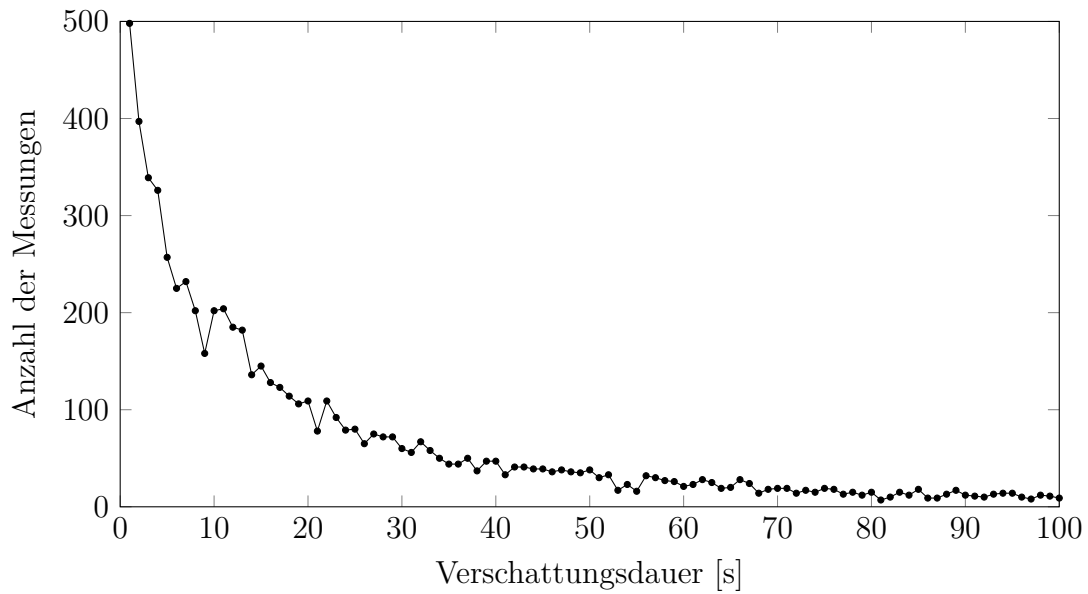


Abbildung 3.7: Dargestellt ist die Verteilung der Verschattungsdauer für die 8276 detektierten Verschattungen im Zeitraum vom 20.03. bis 28.10.2016.

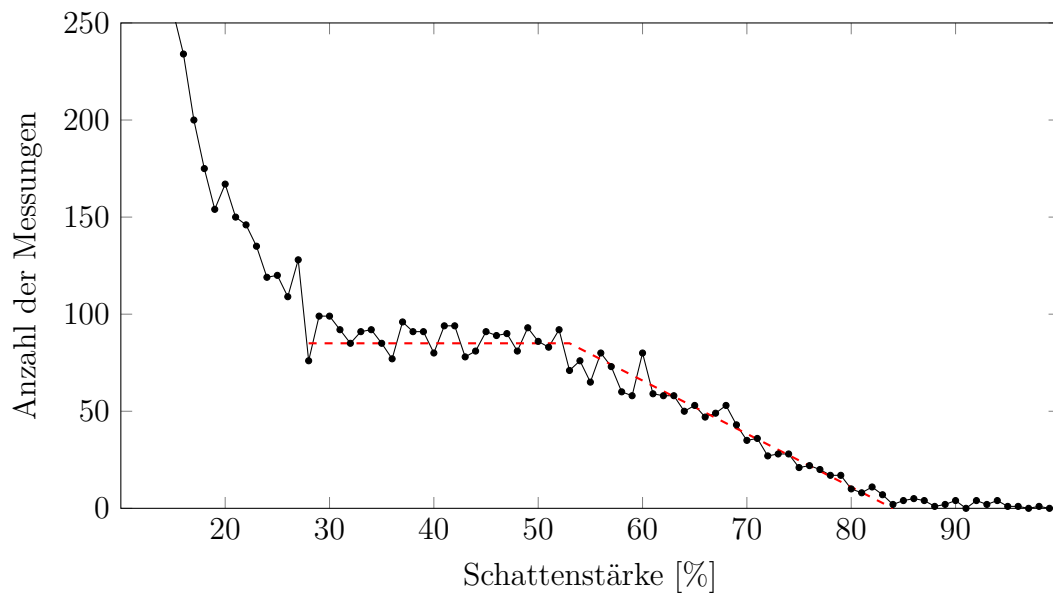


Abbildung 3.8: Dargestellt ist die Verteilung der Schattenstärke für die 8276 detektierten Verschattungen im Zeitraum vom 20.03. bis 28.10.2016. Bis zu einer Schattenstärke von 30 % fällt der Verlauf etwa symptotisch ab. Die Anzahl der detektierten Verschattungen ist im Bereich von 30 % bis 55 % etwa konstant. Für Schattenstärken von über 55 % fällt der Verlauf etwa linear ab und erreicht bei etwa 85 % nahezu das Nullniveau.

eingehend analysiert. Die von den Autoren verwendete Methodik basiert jedoch auf der Auswertung von drei Einstrahlungssensoren, welche einen Abstand von mehreren Metern zueinander aufweisen. Die Berechnung der Verschattungen erfolgt über die Linear-Cloud-Edge-Methode nach Bosch u. a. (2013), welche in Kapitel 2.2.2 beschrieben wird. Ein weiterer Unterschied besteht darin, dass lediglich Verschattungen mit einer Schattenstärke von über 40 % registriert und zur Auswertung herangezogen werden. Trotz der unterschiedlichen Methodik gelangen die Autoren zu ähnlichen Ergebnissen: Es wird ebenfalls festgestellt, dass sehr dicke Wolken (Schattenstärke über 75 %) eher selten beobachtet werden. Die Verteilung der Schattenstärke ist im Bereich von über 40 % sehr ähnlich zu der in Lappalainen u. Valkealahti (2016a) visualisierten Verteilung und weicht nur im Bereich von 40 bis 50 % merklich ab. Die Autoren betonen jedoch, dass die Verteilung insbesondere für Schattenstärken von weniger als 50 % maßgeblich von der von Ihnen gewählten Methodik abhängt. Der lineare Abfall zwischen etwa 55% und 85% kann in Lappalainen u. Valkealahti (2016a) ebenfalls identifiziert werden. Die Verteilung der Verschattungszeit ist in Lappalainen u. Valkealahti (2016a) ebenfalls qualitativ ähnlich. Im Folgenden werden die quantitativen Aussagen aus Lappalainen u. Valkealahti (2016a) mit den hier vorgestellten Ergebnissen verglichen, wobei sich der Zahlenwert in Klammern auf die Ergebnisse in Lappalainen u. Valkealahti (2016a) bezieht. Bei dieser Betrachtung werden zur besseren Vergleichbarkeit ebenfalls lediglich Wolken mit einer Schattenstärke von über 40 % berücksichtigt. Die größte beobachtete Schattenstärke beträgt 98 % (95 %), das arithmetische Mittel der Schattenstärke 56,4 % (59,5 %). Der Anteil der Verschattungen, die eine Schattenstärke von mehr als 80 % oder 90 % aufweisen beträgt 2,9 % (3,9 %) beziehungsweise 0,7 % (0,1 %).

In Abbildung 3.9 ist die Verschattungsdauer über die Schattenstärke für alle detektierten Verschattungen mit einer Verschattungsdauer von mehr als 10 Sekunden aufgetragen. Ein einfacher Zusammenhang zwischen der Verschattungsdauer und der Schattenstärke kann nicht festgestellt werden. Zur quantitativen Analyse werden auf Basis des Streudiagramms Verschattungsklassen eingeführt. Hierbei wird die Schattenstärke und die Verschattungsdauer in drei beziehungsweise vier Klassen eingeteilt. Die Einführung dieser Klassen soll die Unterscheidung von verschiedenen Wolkentypen ermöglichen. Die Schattenstärke wird in die Intervalle

- ≤ 30 % für dünne Wolken
- > 30 % und ≤ 60 % für mitteldicke Wolken und
- > 60 % für dicke Wolken

unterteilt. Die Charakterisierung der Verschattungsdauer erfolgt mittels der Klassen

- ≤ 60 Sekunden für kleine Verschattungsdauern
- > 60 Sekunden und ≤ 300 Sekunden für mittlere Verschattungsdauern
- > 300 Sekunden und ≤ 600 Sekunden für große Verschattungsdauern und
- > 600 Sekunden für (teil-)bedeckte Bewölkungssituationen.

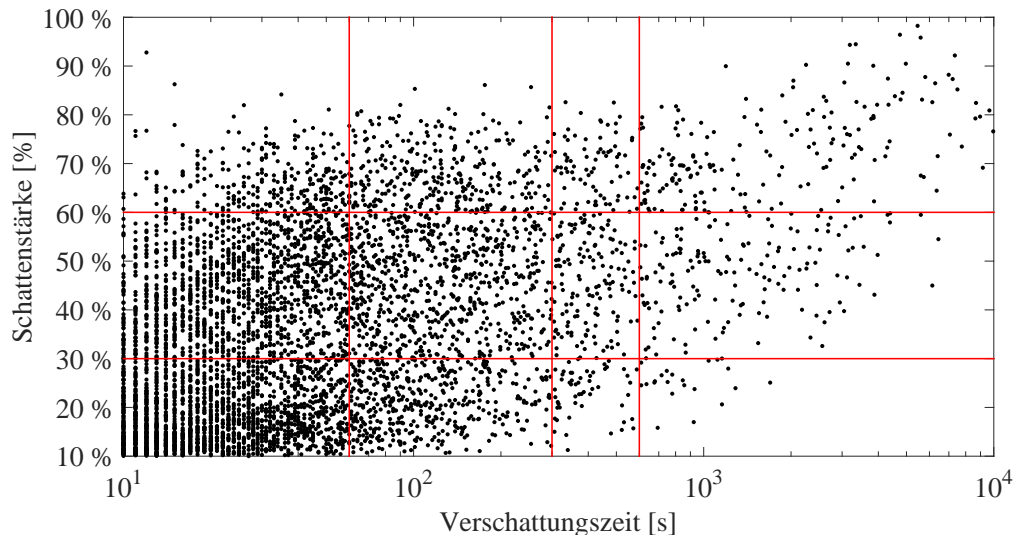


Abbildung 3.9: Dargestellt ist die Schattenstärke über die Verschattungszeit. Angedeutet ist in rot außerdem die eingeführte Klassifizierung.

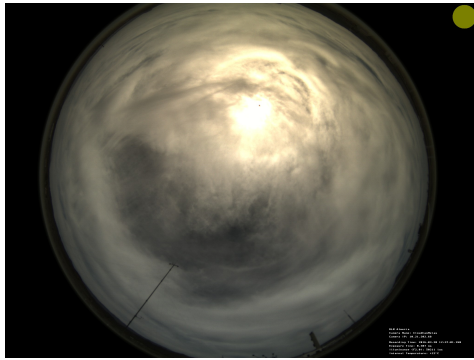
In der Literatur sind andere Ansätze zur Klassifizierung bekannt. Diese basieren auf der Auswertung von GHI- oder DNI-Messungen (Feldhoff (2015)) oder auf der Analyse von Wolkenkamerabildern (Heinle u. a. (2010)). In den Tabellen 3.1 ist das Ergebnis der vorgenommenen Klassifizierung für alle Verschattungen im Untersuchungszeitraum quantifiziert. Zur besseren Übersicht entspricht der Aufbau der Tabellen der graphischen Anordnung der Klassen in Abbildung 3.9. Mehr als die Hälfte der Wolken weisen eine Schattenstärke von weniger als 30 % und gleichzeitig eine Verschattungsdauer von weniger als 60 Sekunden auf. Kurze Verschattungen mit einer hohen Schattenstärke kommen mit einer relativen Häufigkeit von 3,4 % recht selten vor. Bei diesen Verschattungen handelt es sich in den allermeisten Fällen um kleine, dunkle Kumuluswolken mit einer sehr geringen Transmissivität. Den Klassen mit einer Verschattungsdauer von über 300 Sekunden und einer Schattenstärke von über 60 % können vor allem große Wolken mit geringer Transmissivität zugeordnet werden, der zugehörige Anteil beträgt 3,4 %. Insgesamt beträgt der Anteil der Wolken mit einer großen Schattenstärke (> 60 %) 10,5 %. Dünne Wolken, deren Schattenstärke 30 % nicht übersteigt und deren zugehörige Verschattung mindestens 60 Sekunden andauert, machen etwa 6,2 % aller Verschattungen aus. Der Anteil der sehr langen Verschattungen (> 600 Sekunden) beträgt 4,6 %.

Die Klassifizierung der Verschattungen ermöglicht neben einer Gesamtanalyse für den kompletten Betrachtungszeitraum ebenfalls die Charakterisierung der Bewölkungssituationen einzelner Tage. In Abbildung 3.10 sind drei beispielhafte Bewölkungssituationen dargestellt. Oben links ist die Aufnahme einer Wolkenkamera für den 30.03.2016 dargestellt. Es lässt sich ein großes Wolkenfeld erkennen, dessen Transmissivität jedoch so groß ist, dass die Sonne noch sichtbar durchscheinen kann. In Abbildung 3.11 ist das Signal eines Sensors des CSS dargestellt. Der Verlauf weist

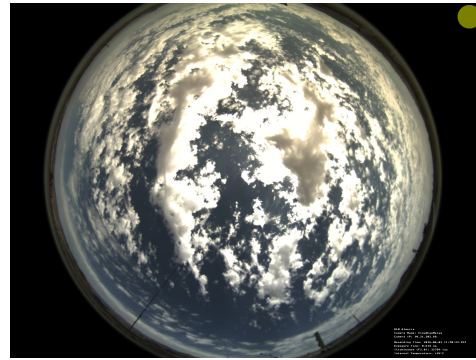
Tabelle 3.1: Klassifizierung der Verschattungen nach ihrer Dauer und Schattenstärke für den Zeitraum vom 20.03. bis 28.10.2016. Die obere Tabelle weist die absolute Anzahl an Detektionen für die jeweilige Klasse aus, die untere Tabelle die relativen Häufigkeiten.

		Verschattungsdauer [s]				Summe
		< 60	60 – 300	300 – 600	> 600	
Schatten- stärke	> 60 %	282	311	78	201	872
	30 – 60 %	1513	696	147	158	2514
	< 30 %	4378	437	54	21	4890
	Summe	6173	1444	279	380	

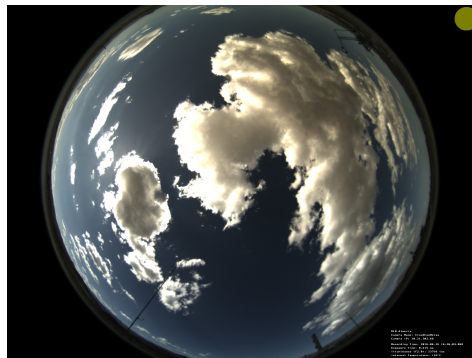
		Verschattungsdauer [s]				Summe
		< 60	60 – 300	300 – 600	> 600	
Schatten- stärke	> 60 %	3,4 %	3,8 %	0,9 %	2,4 %	10,5 %
	30 – 60 %	18,3 %	8,4 %	1,8 %	1,9 %	30,4 %
	< 30 %	52,9 %	5,3 %	0,7 %	0,3 %	59,1 %
	Summe	74,6 %	17,4 %	3,4 %	4,6 %	



(a) 30.03.2016



(b) 03.06.2016



(c) 16.06.2016

Abbildung 3.10: Dargestellt sind drei Tage mit einer unterschiedlichen Bewölkungscharakteristik. Am 30.03.2016 herrschen vor allem dünne Altostratus-Wolken vor. Am 03.06.2016 bestimmen kleine, dicke Altocumulus-Wolken die Himmelssituation. Am 16.06.2016 werden vor allem große Kumuluswolken mit geringer Transmissivität beobachtet.

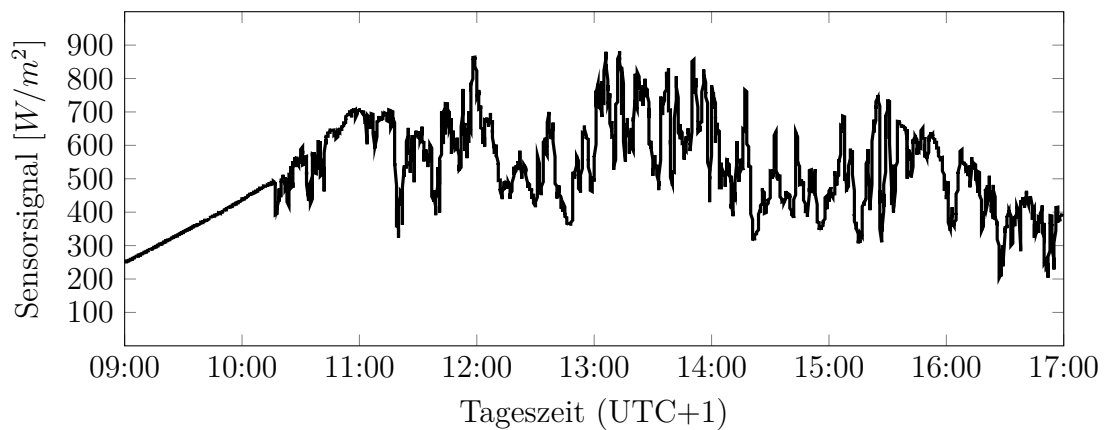


Abbildung 3.11: Dargestellt ist das Einstrahlungssignal für den 30.03.2016. Die Gradienten des Einstrahlungssignals sind weniger ausgeprägt als bei den anderen beiden Beispieltagen mit optisch dicken Wolken.

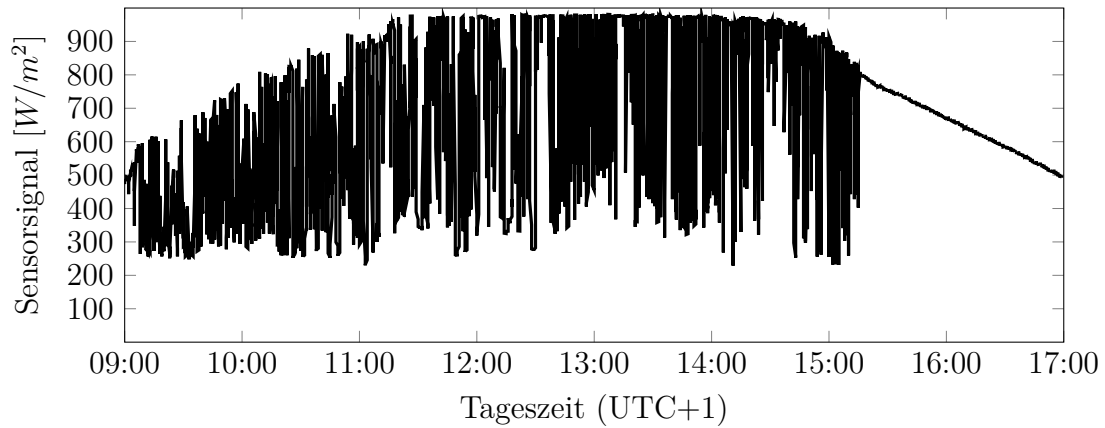


Abbildung 3.12: Dargestellt ist das Einstrahlungssignal für den 03.06.2016. Bis kurz nach 15:00 Uhr können eine Vielzahl von steilen Leistungsabfällen beobachtet werden, welche durch kleine, dicke Altocumulus-Wolken hervorgerufen werden. Nach Durchzug des Wolkengebiets ist der Himmel wolkenlos. Es kann beobachtet werden, dass die im CSS eingebauten Sensoren Einstrahlungssignale von über etwa 1000 W/m^2 nicht korrekt messen können. Da derart hohe Strahlungsleistungen jedoch nicht während Verschattungen auftreten, sind die Auswirkungen auf die CSS Messungen und die vorgestellten Ergebnisse vernachlässigbar.

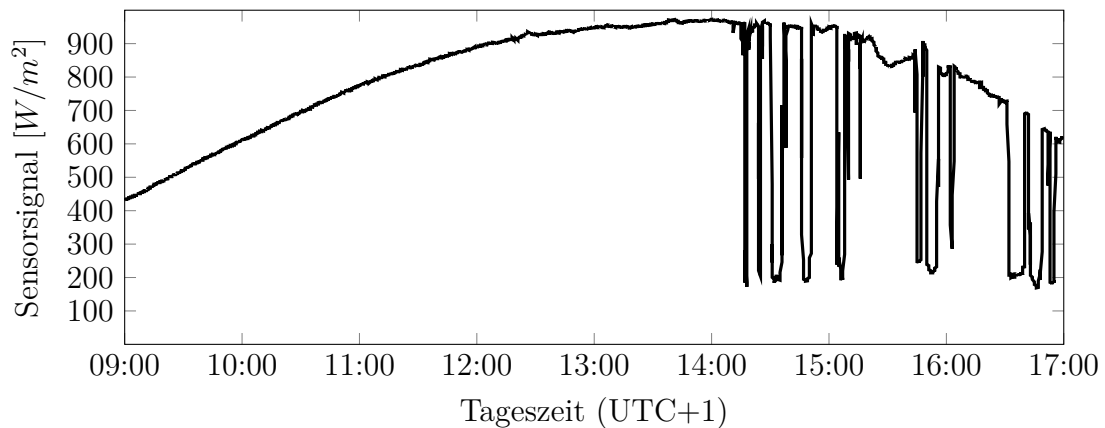


Abbildung 3.13: Dargestellt ist das Einstrahlungssignal für den 16.06.2016. Bis etwa 14:00 Uhr ist der Himmel wolkenlos. Anschließend führen große, dicke Kumuluswolken zu verhältnismäßig langen, ausgeprägten Leistungseinbrüchen.

deutliche Schwankungen auf, jedoch sind die minimalen Einstrahlungsleistungen während der Verschattungen mit meist über 400 W/m^2 noch recht groß. Eine fundamental andere Bewölkungssituation kann hingegen am 03.06.2016 beobachtet werden. Das Wolkenkamerabild (in Abbildung 3.10, oben rechts) zeigt eine prototypische Bewölkungssituation für diesen Tag. Es existieren viele kleine Wolken, deren Transmissivität gering ist. Das zugehörige Sensorsignal ist in Abbildung 3.12 dargestellt: Es existieren zahlreiche, steile Rampen und die einzelnen Verschattungsdauern sind gering. Gleichzeitig weisen die Minima der Einstrahlungsleistung aufgrund der geringen Transmissivität der Wolken sehr geringe Werte auf, sodass die zugehörigen Schattenstärken sehr groß sind. Der dritte Beispieltag mit einer fundamental anderen Bewölkungssituation ist der 16.06.2016 (Abbildung 3.10, unten). An diesem Tag existieren vor allem große Kumuluswolken mit einer geringen Transmissivität. In Abbildung 3.13 ist das zugehörige Sensorsignal dargestellt. Die Abfälle sind deutlich ausgeprägt, was in großen Schattenstärken resultiert. Die Verschattungen dauern teilweise mehr als 5 Minuten an. Der Bereich zwischen 14:00 und 15:00 Uhr ist vergrößert auch in Abbildung 3.5 dargestellt. Die absolute Anzahl der Verschattungen mit einer Schattenstärke von über 50 % ist an diesem Tag gering (13).

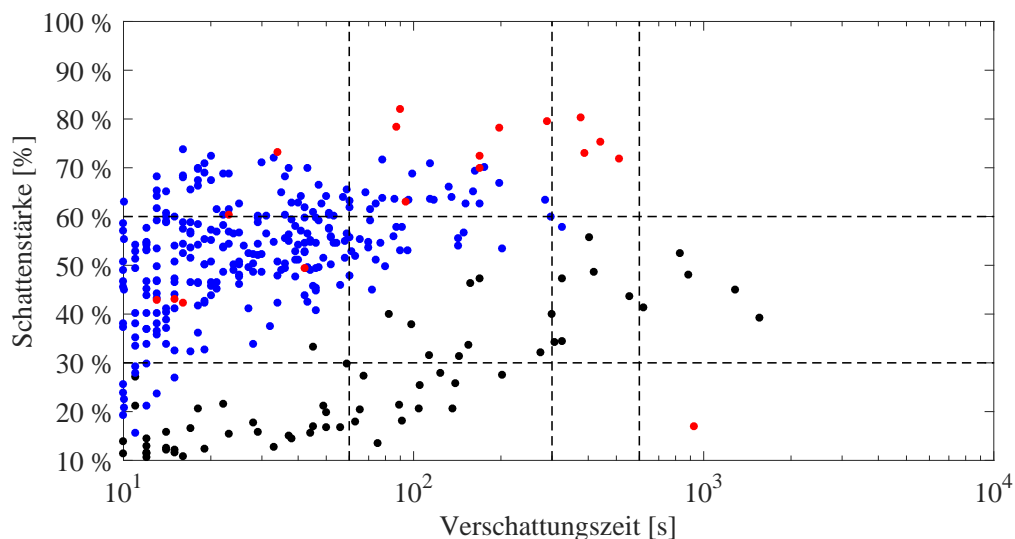


Abbildung 3.14: Aufgetragen ist die Schattentärke über der Verschattungsdauer für die Verschattungen der 3 Beispieltage. Der 30.03.2016 ist in schwarz, der 03.06.2016 in blau und der 16.06.2016 in rot.

In Abbildung 3.14 sind die Streudiagramme für alle drei Tage dargestellt. In schwarz abgebildet sind die Verschattungen des 30.03.2016, in blau diejenigen des 03.06.2016 und in rot die des 16.06.2016. In Tabelle 3.2 ist das Ergebnis quantitativ zusammengefasst. Am 30.03. wird keine Verschattung mit einer Schattenstärke von über 60 % detektiert. Am 16.06. hingegen weisen über 50 % der Verschattungen eine

Tabelle 3.2: Dargestellt ist das Ergebnis der Klassifizierung der Verschattungen für die drei Beispieltage. Angegeben sind die relative Häufigkeiten der Verschattungen für jede Klasse.

30.03.2016 (92 Messungen)						
		Verschattungsdauer [s]				Summe
		< 60	60 – 300	300 – 600	> 600	
Schatten- stärke	> 60 %	—	—	—	—	—
	30 – 60 %	1,1 %	9,8 %	6,5 %	5,4 %	22,8 %
	< 30 %	64,1 %	13,0 %	—	—	77,2 %
	Summe	65,2 %	22,8 %	6,5 %	5,4 %	

03.06.2016 (432 Messungen)						
		Verschattungsdauer [s]				Summe
		< 60	60 – 300	300 – 600	> 600	
Schatten- stärke	> 60 %	12,3 %	4,6 %	—	—	16,9 %
	30 – 60 %	48,6 %	4,9 %	0,2 %	—	53,7 %
	< 30 %	29,4 %	—	—	—	29,4 %
	Summe	90,3 %	9,5 %	0,2 %	—	

16.06.2016 (25 Messungen)						
		Verschattungsdauer [s]				Summe
		< 60	60 – 300	300 – 600	> 600	
Schatten- stärke	> 60 %	8 %	28 %	16 %	—	52 %
	30 – 60 %	16 %	—	—	—	16 %
	< 30 %	28 %	—	—	4 %	32 %
	Summe	52 %	28 %	16 %	4 %	

Schattenstärke von über 60 % auf. Der Anteil der dicken, großen Wolken (Schattenstärke über 60 % und Dauer über 60 s) beträgt am 16.06. 44 %, am 03.06. hingegen lediglich 4,6 %. Die Verschattungen des 03.06. weisen im Mittel eine deutlich kürzere Verschattungsdauer als die der anderen Tage auf. Der Anteil der Verschattungen mit einer Dauer von bis zu 60 Sekunden beträgt am 03.06. über 90 %, für den 30.03. 65 % und für den 16.06. lediglich 52 %. Für den 16.06. werden mit 25 Verschattungen deutlich weniger Verschattungen registriert als am 30.03. (92) oder am 03.06. (432).

Analyse der vom CSS bestimmten Bewegungsvektoren

Der CSS hat im Zeitraum vom 20.03. bis 28.10.2016 insgesamt 5830 Bewegungsvektoren bestimmt. Die durchschnittliche ermittelte Geschwindigkeit beträgt 9,52 m/s, der Median 7,81 m/s. 90 % der Messungen weisen eine Geschwindigkeit von weniger als 18,4 m/s auf, gleichzeitig übersteigen 90 % der Messungen 3,8 m/s. Die Verteilung der ermittelten Geschwindigkeiten ist in Abbildung 3.15 dargestellt. Diese Daten beziehen sich auf den derzeit im Einsatz befindlichen CSS ohne Berücksichtigung der in Abschnitt 3.2 vorgestellten Verbesserungen des Berechnungsalgorithmus.

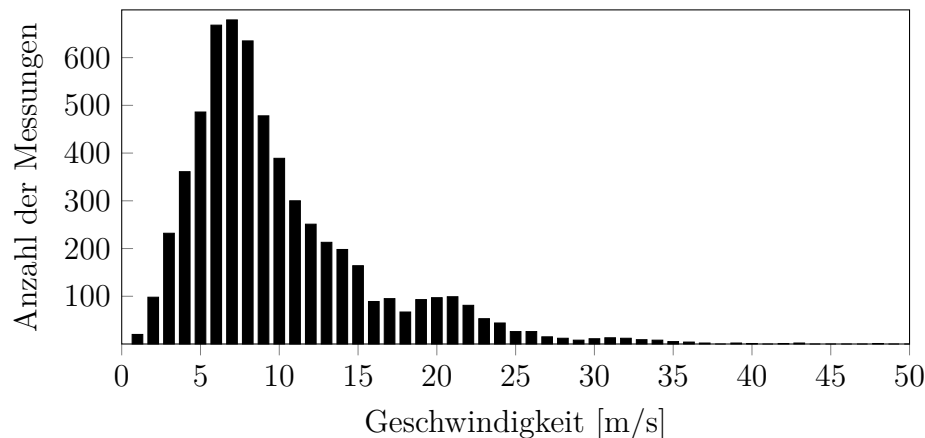


Abbildung 3.15: Dargestellt ist die Geschwindigkeitsverteilung der CSS Messungen im Zeitraum vom 20.03. bis 28.10.2016 in Klassen zu je 1 m/s.

Der CSS bestimmt idealerweise zu jedem Abfall und zu jedem Anstieg des Sensorsignals eine Wolkengeschwindigkeit. Der Abfall und der Anstieg des Sensorsignals ist identisch mit dem Beginn beziehungsweise dem Ende einer Verschattung. Im Folgenden wird der Frage nachgegangen, zu wie vielen Signalabfällen beziehungsweise -anstiegen der CSS eine Messung ermittelt. Dazu wird geprüft, ob zum Zeitpunkt eines Signalabfalls oder -anstiegs eine CSS-Messung vorliegt. Da alleine aufgrund der festen Messintervalle des CSS nicht erwartet werden kann, dass die CSS-Messungen sekundengenau mit dem Beginn oder dem Ende einer Verschattung übereinstimmen, wird eine Zeittoleranz zur Auswertung eingeführt. Liegen die Zeitpunkte weniger als ± 30 Sekunden auseinander, werden diese als übereinstimmend gewertet. Die Analyse

des Zeitraums vom 20.03. bis 28.10.2016 ergibt, dass zu 875 der insgesamt 8276 Verschattungen (bestehend aus einem Signalabfall und einem -anstieg) mindestens eine CSS-Messung mit dem Beginn oder dem Ende der Verschattung übereinstimmt. Dies entspricht einem Anteil von 10,6 %. Es ist zu beachten, dass in diese Statistik nur CSS-Messungen einfließen, welche mit dem Beginn oder dem Ende einer Verschattung übereinstimmen, nicht jedoch CSS-Messungen während einer Verschattung.

In Abbildung 3.16 sind die vom CSS korrekt detektierten Verschattungen als Streudiagramm dargestellt. In Tabelle 3.3 ist der Anteil der berechneten Verschattungen dargestellt, für die der CSS eine Geschwindigkeitsmessung ermitteln konnte. Bei den Verschattungen mit einer Schattenstärke von über 60 % und einer Dauer von weniger als 60 Sekunden wird vom CSS zu 21,6 % eine Geschwindigkeit ermittelt. Insgesamt werden vor allem Verschattungen mit einer hohen Schattenstärke und kurzen Dauer vom CSS detektiert. Grund hierfür sind die steilen Gradienten des Sensorsignals, welche die Messung durch den CSS begünstigen. Diese Verschattungen werden vor allem durch kleine, optisch dicke Wolken verursacht. Insgesamt lässt sich feststellen, dass der Anteil, der vom CSS detektierten Verschattungen mit 10,6 % gering ist. Es wird daher im folgenden Abschnitt 3.2 ein verbesserter Algorithmus zur Bewegungsvektorbestimmung vorgestellt.

3.2 Verbesserung der Bewegungsvektorbestimmung

Wie im vorangegangenen Abschnitt dargestellt, liegen nur zu etwa 10 % der Verschattungen eine CSS-Messung vor. An 6 der 223 untersuchten Tage, an denen mehr als 15 Verschattungen existieren, ermittelt der CSS keinen Bewegungsvektor. Für die untersuchten 223 Tage liegen insgesamt 347 023 Messintervalle vor. Aus einem Messintervall kann maximal eine CSS Messung resultieren. Zu den 347 023 Messintervallen werden vom CSS 5830 Bewegungsvektoren bestimmt, was einem Anteil von 1,7 % entspricht. In diesem Kapitel wird ein verbesserter Algorithmus zur Bestimmung der Bewegungsvektoren für den CSS erarbeitet mit der Zielsetzung, die Anzahl der Messungen zu erhöhen und gleichzeitig die Qualität der Daten

Tabelle 3.3: Aufgeführt ist der jeweilige Anteil der vom CSS detektierten Verschattungen an der Gesamtzahl der Verschattungen einer Klasse. Vom CSS werden vor allem Verschattungen mit einer geringen Verschattungsdauer und hoher Schattenstärke detektiert.

		Verschattungsdauer [s]			
		< 60	60 – 300	300 – 600	> 600
Schattenstärke	> 60 %	21,6 %	16,4 %	16,7 %	9,5 %
	30 – 60 %	16,0 %	13,7 %	9,5 %	6,3 %
	< 30 %	8,0 %	3,7 %	3,7 %	4,8 %

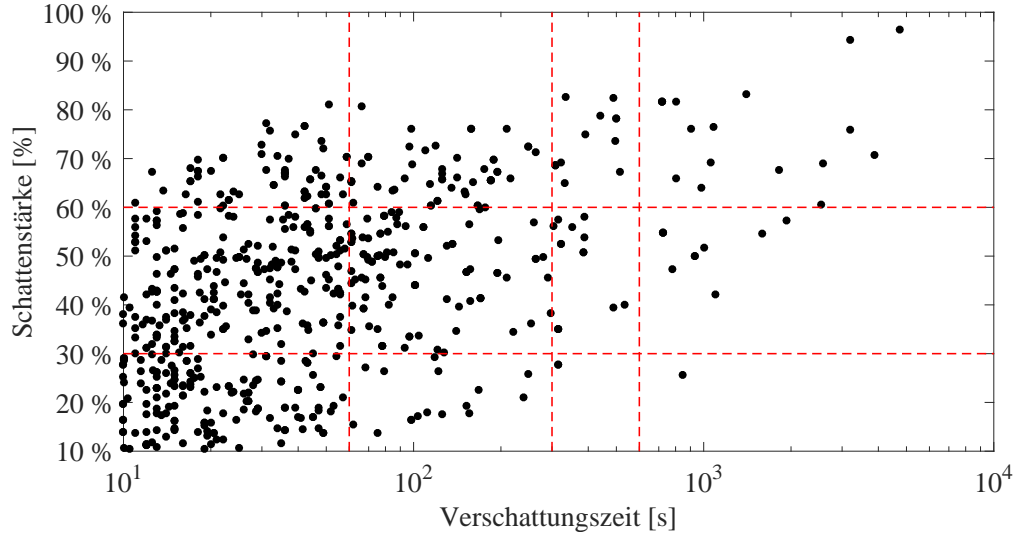


Abbildung 3.16: Aufgetragen ist die Schattenstärke über der Verschattungszeit für die Verschattungen, die vom CSS detektiert wurden. Angedeutet ist in rot außerdem die eingeführte Klassifizierung.

beizubehalten oder idealerweise zu erhöhen.

Wie in Kapitel 2.3.3 beschrieben, berechnet der derzeitig implementierte Algorithmus des CSS zu jedem Messintervall eine Geschwindigkeit und Richtung mit Hilfe der LCE-CF-Methode. Genügt das Berechnungsergebnis bestimmten Gütekriterien wird es als Messwert ausgegeben. Bei einer eingehenden Analyse wird beobachtet, dass bei einer Vielzahl von Berechnungen die Zeitversätze zweier Sensorpaare deutlich vom gefundenen Kosinus-Fit abweichen, wohingegen die übrigen Sensorpaare eine gute Übereinstimmung zeigen. In Abbildung 3.17 sind zwei beispielhafte Fälle dargestellt.

Das Ergebnis des Kosinus-Fits wird in beiden Fällen durch die stark abweichenden Stützstellen der Sensorpaare $\{S_0, S_5\}$ und $\{S_1, S_5\}$ ($\delta = 240^\circ$ beziehungsweise $\delta = 300^\circ$) dominiert. Die Abweichung beider Stützstellen geht also auf die Abweichung eines einzelnen Sensorsignals (Sensor 5) zurück. Die Motivation zur Verbesserung des Algorithmus basiert folglich darauf, den Kosinus-Fit robuster gegen Ausreißer zu machen. Die gewählte Methode der kleinsten Quadrate ist für derartige Abweichungen besonders anfällig. In der Literatur werden zahlreiche Alternativen zur Methode der kleinsten Quadrate vorgestellt und diskutiert. Eine Alternative ist die Methode der kleinsten absoluten Abweichungen (engl. *least absolute deviation*, im Folgenden *LAD-Methode*). Im Vergleich zur Methode der kleinsten Quadrate ändert sich lediglich das übergeordnete Optimierungsproblem zu

$$\min_{\phi, v} \sum_{i=1}^{12} |t_{i,Fit}(\phi, v) - t_i| \quad (3.9)$$

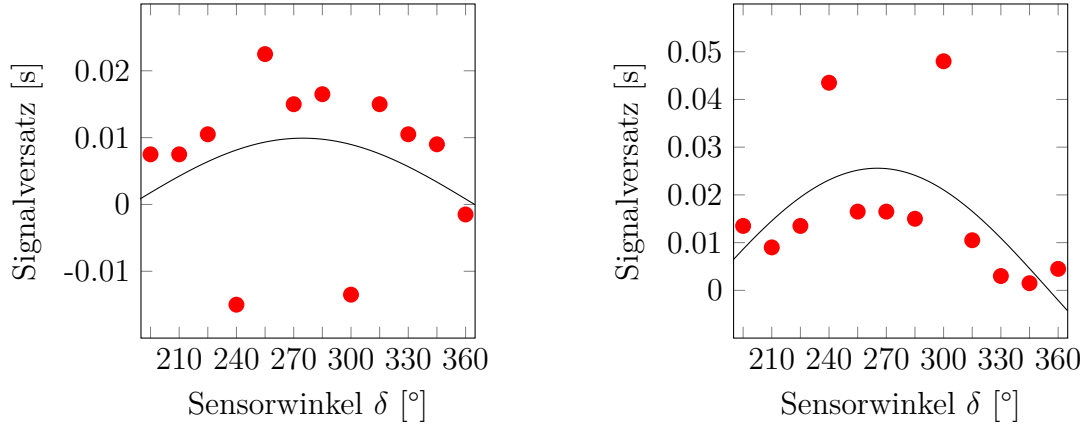


Abbildung 3.17: Die beiden Darstellungen zeigen das Ergebnis des Kosinus-Fits für beispielhafte Messintervalle am 03.06.2016 um 14:23 Uhr und 14:04 Uhr. In beiden Fällen weichen zwei Sensorpaare stark vom resultierenden Kosinus-Fit ab und beeinflussen diesen daher maßgeblich.

Die Berechnung der theoretischen Zeitversätze

$$t_{i,Fit}(\phi, v) = \frac{D}{v} \cos(\phi - \delta_i) \quad \forall i \in \{1, \dots, 12\} \quad (3.10)$$

bleibt unverändert (vergleiche Gleichung 2.17). Ausreißer haben bei dieser Methode aufgrund der fehlenden quadratischen Abhängigkeit keinen derart starken Einfluss auf die Lösung. Ausführliche Beschreibungen der LAD-Methode und deren effiziente Lösung erfolgen in Singleton (1940) und Bloomfield u. Steiger (2012).

Als zweite Alternative zur Methode der kleinsten Quadrate wird die Methode der kleinsten gekürzten Quadrate (engl. *least trimmed squares*, im Folgenden *LTS-Methode*) gewählt. Das zugehörige Optimierungsproblem kann wie folgt formuliert werden

$$\min_{\phi, v} \sum_{i=1}^h r_i^2 \quad (3.11)$$

wobei r_i^2 die quadrierten Residuen darstellen, welche in aufsteigender Reihenfolge

$$r_1^2 \leq \dots \leq r_i^2 \leq \dots \leq r_n^2 \quad (3.12)$$

sortiert sind und h der Anzahl der Summanden entspricht, die nicht abgetrennt werden. Die einzelnen Residuen stellen dabei wie in den bisher vorgestellten Methoden die Differenz

$$r_i = t_{i,Fit}(\phi, v) - t_i \quad (3.13)$$

dar. Die zu Grunde liegende Kosinusbeziehung in Gleichung 3.10 bleibt wiederum unverändert erhalten. Bei dieser Methode wird der Kosinus-Fit basierend auf den

h Stützstellen mit den kleinsten Residuen gebildet. Die übrigen $n - h$ Stützstellen haben keinen Einfluss auf die Lösung $(\phi, v)^T$ des Optimierungsproblems. Die LTS-Methode weist daher eine höhere Robustheit als die LAD-Methode auf. Für den CSS wird $h = 10$ festgelegt. Bei der Wahl dieses Parameters ist die Wahl einer geraden Anzahl von Stützstellen sinnvoll, da eins der neun Sensorsignale Einfluss auf zwei der zwölf Sensorpaare hat. Ist ein Sensorsignal gestört, bewirkt dies große Abweichungen von zwei Stützstellen. Es erscheint wenig sinnvoll zur Berechnung des Kosinus-Fits lediglich 8 oder 6 Stützstellen zu berücksichtigen, da in diesen Fällen akzeptiert würde, dass 4 beziehungsweise 6 der 12 Sensorpaare als Ausreißer eingestuft werden. Detaillierte Informationen zur LTS-Methode finden sich in Giloni u. Padberg (2002), Čížek (2006) und Mount u. a. (2014). Als dritte Alternative wird die Methode der kleinsten Median-Quadrate (engl. *least median squares*, im Folgenden *LMS-Methode*) untersucht. Die zugehörige Zielfunktion lautet

$$\min_{\phi, v} \text{median} \left((t_{i, Fit}(\phi, v) - t_i)^2 \right) \quad (3.14)$$

Für eine gerade Anzahl von Stützstellen n kann keine einzelne Stützstelle als Median ausgewählt werden, weshalb in der Literatur üblicherweise die Stützstelle $\frac{n}{2} + 1$ gewählt wird (Giloni u. Padberg (2002)). Für die 12 Sensorpaare des CSS ist dies das siebt kleinste Residuum. Die zu Grunde liegende Idee der Methode ist, ein einzelnes Residuum (den Median) zu minimieren. Alle Residuen, die größer sind als dieses Residuum beeinflussen den Kosinus-Fit nicht. Für den CSS bedeutet dies, dass der Kosinus-Fit letztlich nur auf Basis der 7 Sensorpaare mit den kleinsten Residuen berechnet wird. Weiterführende Informationen zu dieser Methode finden sich in Huber (2009) und Rousseeuw u. Leroy (2005). In Abbildung 3.18 sind die resultierenden Kosinus-Fits aller vorgestellten Methoden für die gleichen Messintervalle wie in Abbildung 3.17 abgebildet. Dargestellt ist der Kosinus-Fit der LAD-Methode in blau, der LTS-Methode in rot und der LMS-Methode in grün. Mit den drei gewählten alternativen Methoden wird ein Kosinus-Fit berechnet, welcher zu 10 der 12 Signalversätze eine deutlich bessere Übereinstimmung aufweist als die herkömmliche Methode der kleinsten Fehlerquadrate (schwarz). Bei Intervallen, bei denen die zeitlichen Signalversätze sehr gut durch die Kosinusfunktion angenähert werden können, erzielen alle vier Methoden nahezu identische Ergebnisse. Ein Beispiel hierfür ist in Abbildung 3.19 gezeigt.

Wie für die Methode der kleinsten Quadrate müssen für die alternativen Methoden ebenfalls geeignete Gütekriterien für die berechneten Kosinus-Fits definiert werden. Auch für die Alternativmethoden werden hierfür normalisierte Residuen verwendet. Für die LAD-Methode wird das normalisierte Residuum

$$r_{LAD} = \frac{R_{LAD}}{\sum_{i=1}^{12} \left| t_i - \frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} t_i \right|} \quad (3.15)$$

mit

$$R_{LAD} = \sum_{i=1}^{12} \left| (t_{i, Fit}(\phi, v) - t_i) \right| \quad (3.16)$$

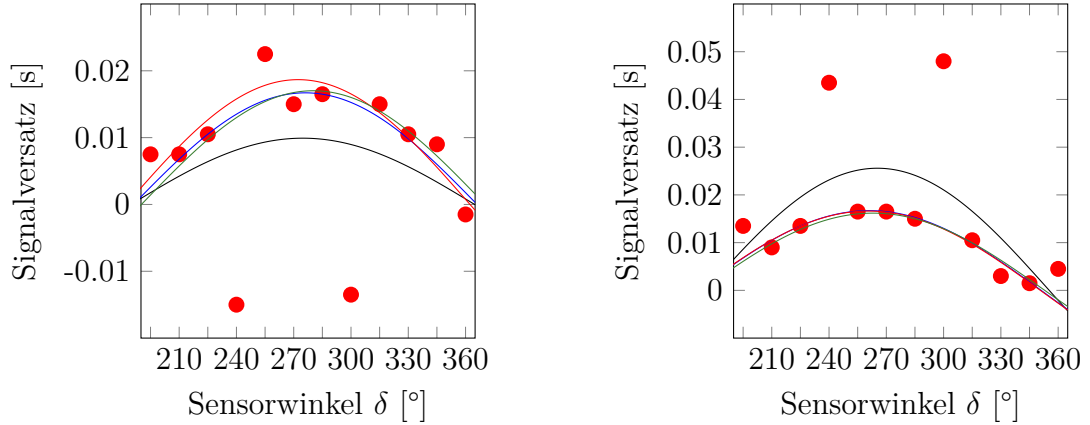


Abbildung 3.18: Dargestellt ist der Kosinus-Fit für die drei Alternativmethoden sowie der Methode der kleinsten Quadrate für die beiden beispielhaften Messintervalle aus Abbildung 3.17. Der Kosinus-Fit der LAD-Methode ist in blau dargestellt, der Verlauf für die LTS-Methode und LMS-Methode in rot beziehungsweise grün. Der Kosinus-Fit der Methode der kleinsten Quadrate ist in schwarz dargestellt. Alle drei Methoden zeigen eine deutlich größere Robustheit gegenüber den beiden stark abweichenden Stützstellen als die Methode der kleinsten Quadrate.

definiert und für die LTS-Methode das normalisierte Residuum

$$r_{LTS} = \frac{R_{LTS}}{\sum_{i=1}^h (t_i - \frac{1}{h} \sum_{i=1}^h t_i)^2} \quad (3.17)$$

mit

$$R_{LTS} = \sum_{i=1}^h ((t_{i,Fit}(\phi, v) - t_i)^2) \quad (3.18)$$

wobei die Reihenfolge der t_i der aufsteigenden Reihenfolge der zugehörigen Residuen entspricht. Zur Bildung des Residuums werden also nur diejenigen h Stützstellen herangezogen, die von der LTS-Methode nicht abgetrennt werden. Für die LTS-Methode wird $h = 10$ gesetzt. Für die LMS-Methode wird die gleiche Definition des normalisierten Residuums verwendet wie für die LTS-Methode, aufgrund der Verwendung des Medians jedoch mit $h = 7$. Empirisch werden die Schwellenwerte der Methoden zu

- $\hat{r}_{LAD} = 0,4$
- $\hat{r}_{LTS} = 0,1$
- $\hat{r}_{LMS} = 0,005$

definiert. Übersteigt das normalisierte Residuum den Schwellenwert, wird die Berechnung verworfen. Die Festlegung dieser Schwellenwerte beruht auf der Abwägung

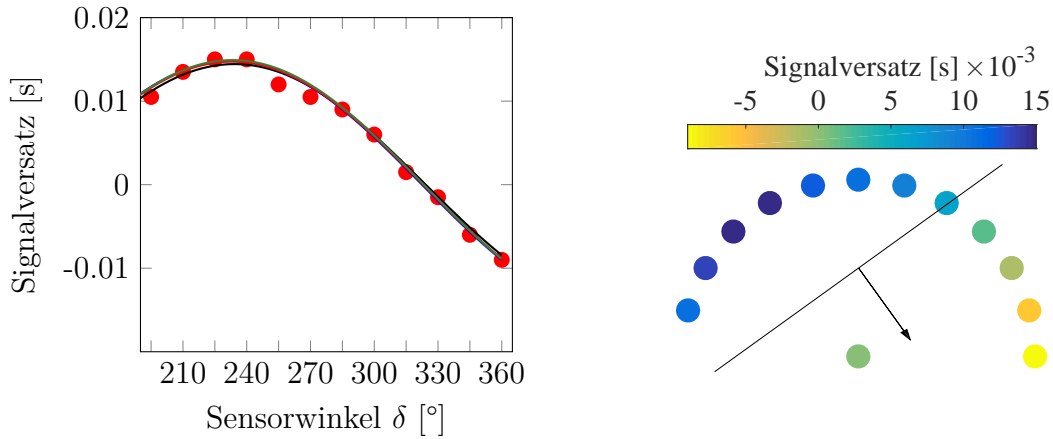


Abbildung 3.19: In der linken Darstellung ist das Ergebnis der Berechnung des Kosinus-Fits für ein Messintervall (03.06.2016, 13:23 Uhr) mit der Methode der kleinsten Quadrate sowie den drei untersuchten Alternativmethoden gezeigt. Der Kosinus-Fit aller vier Methoden ist nahezu identisch. In der rechten Abbildung sind die Zeitversätze der Sensorpaare farbig dargestellt. Der Pfeil gibt die Richtung der fortschreitenden Verschattung an. In diesem Fall bewegt sich die Verschattung von oben links nach unten rechts. Der Sensor unten rechts ($\delta = 360^\circ$) wird zuletzt verschattet.

mehrerer Einflussfaktoren: Zum einen wird beabsichtigt, möglichst viele Bewegungsvektoren zu ermitteln, was durch einen möglichst hohen Schwellenwert erzielt würde. Zum anderen soll eine hohe Güte der Ergebnisse gewährleistet sein, was einen niedrigen Schwellenwert nahelegt. Es werden außerdem Berechnungen verworfen, bei denen eine Geschwindigkeit von mehr als 50 m/s ermittelt wird. Das nicht-lineare Optimierungsproblem wird mittels der in MATLAB® unterstützten *Nelder-Mead*-Methode gelöst (Lagarias u. a. (1998)). Da die Rechenzeit zur Lösung des Optimierungsproblems mit 0,4 Sekunden gering ist, wird auf eine spezifische Implementierung effizienterer Algorithmen verzichtet. Aufgrund der geringen Anzahl von 12 Stützstellen ist es auch möglich, dass nicht-lineare Optimierungsproblem durch einen *Brute-Force*-Ansatz zu lösen. Hierzu müssen $\binom{12}{h}$ gewöhnliche *least-squares*-Optimierungsprobleme gelöst werden. Für $h = 10$ sind dies 66 Optimierungsprobleme.

Bei der Auswertung aller 347 023 Messintervalle für den betrachteten Zeitraum von 223 Tagen werden durch die derzeit im CSS implementierte Methode der kleinsten Quadrate (im Folgenden *LSQ-Methode* genannt) 5830 Bewegungsvektoren ermittelt, was einem Anteil von 1,7 % entspricht. Die LAD-Methode ermittelt für den gleichen Zeitraum 8034, die LTS-Methode 17334 und die LMS-Methode 21535 Bewegungsvektoren. Zur Bewertung der Qualität der Messergebnisse werden im Folgenden die Messintervalle betrachtet, für die sowohl die jeweilige Alternativmethode als auch die LSQ-Methode einen Bewegungsvektor bestimmt. Für die LAD-Methode stimmen 5309 Messintervalle mit den 5830 Messintervallen der LSQ-Methode überein, was einem Anteil von 91,1 % entspricht. Für die übereinstimmenden Messintervalle

werden die Abweichung der Messgrößen der jeweiligen Alternativmethode und der LSQ-Methode betrachtet. Als statistische Größen werden der BIAS und die absolute Abweichung (MAE) betrachtet. Die Ergebnisse sind in Tabelle 3.4 dargestellt. Die geringsten Abweichungen zur LSQ-Methode weist in allen Kriterien die LTS-Methode auf. Aus diesem Grunde wird sie gegenüber den anderen beiden Alternativmethoden favorisiert. Für ein beispielhaftes Zeitintervall sind in Abbildung 3.20 die ermittelten Geschwindigkeiten und Richtungen aller vier Methoden dargestellt. Zwei weitere Beispielintervalle finden sich im Anhang A.2.

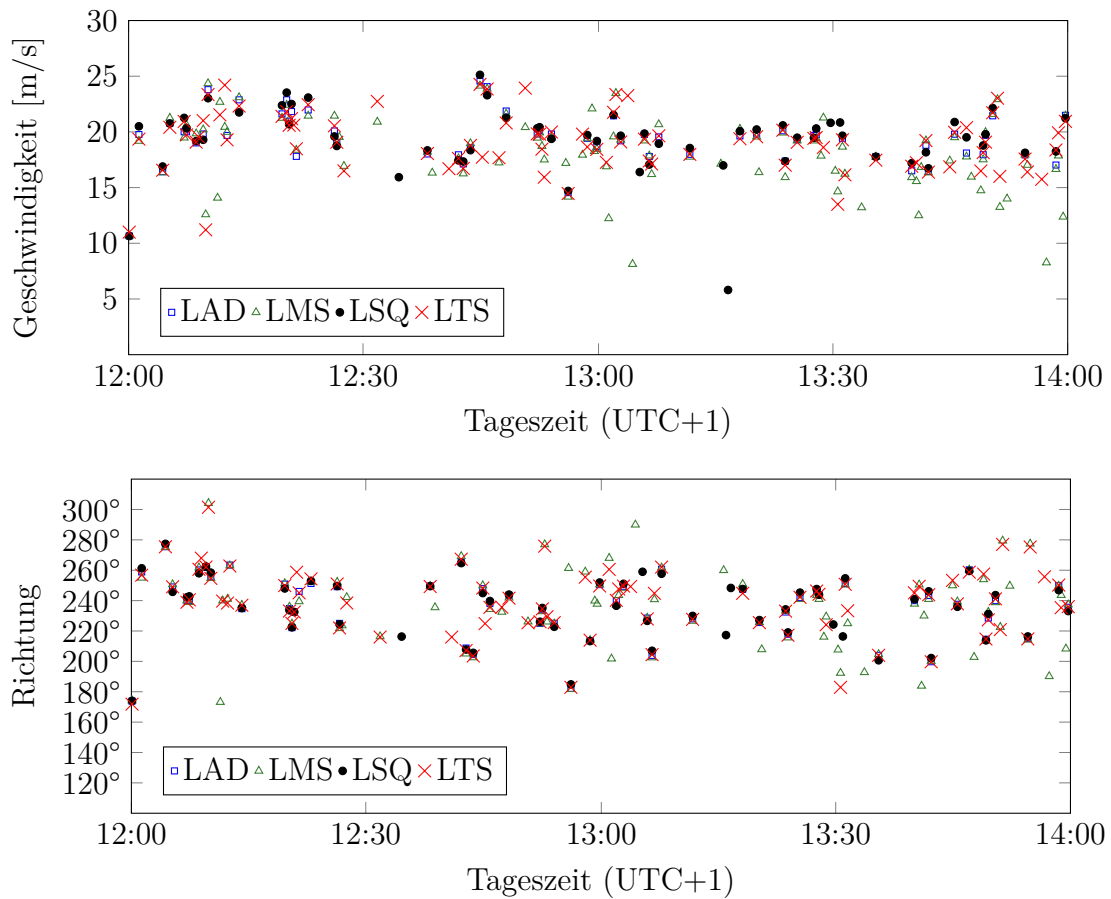


Abbildung 3.20: Dargestellt sind die Geschwindigkeiten und Bewegungsrichtungen für die vier untersuchten Methoden: Die derzeit im CSS verwendete Methode der kleinsten Quadrate ist in schwarz dargestellt, die favorisierte LTS-Methode in rot, die LAD-Methode in blau und die LMS-Methode in grün. Die favorisierte LTS-Methode liefert für dieses betrachtete Zeitintervall 57 % mehr Messungen als die Methode der kleinsten Quadrate. Dargestellt ist der Zeitraum von 12:00 bis 14:00 Uhr am 03.06.2016.

Im Folgenden soll die Notwendigkeit des Einsatzes einer alternativen Berechnungsmethode nochmals motiviert werden: Mit der LTS-Methode werden am 03.06.2016 409 Bewegungsvektoren bestimmt, mit der derzeit im CSS verwendeten LSQ-

Tabelle 3.4: Dargestellt sind die Ergebnisse für die drei Alternativmethoden. Die Fehlergrößen BIAS und MAE beziehen sich auf die Abweichung zu den Messwerten der LSQ-Methode.

		LAD	LTS	LMS
	Messungen	8034	17334	21535
	Mit LSQ-Methode übereinstimmende Messintervalle	91,1 %	94,7 %	91,8 %
Geschwindig- keit [m/s]	BIAS	0,031	0,007	0,064
	MAE	0,615	0,366	0,584
Richtung	BIAS	6,6°	5,6°	6,8°
	MAE	16,1°	13,7°	15,8°

Methode jedoch lediglich 240. Grundsätzlich ist es möglich durch ein Herabsetzen des Schwellenwerts der LSQ-Methode ebenso viele Bewegungsvektoren zu bestimmen. Dies bewirkt jedoch, dass die Qualität der Messdaten stark abnimmt, wie aus Abbildung 3.21 hervorgeht. Dargestellt sind in schwarz die Bewegungsvektoren der LSQ-Methode mit dem derzeit im CSS verwendeten Schwellenwert von $\hat{r}_{LSQ} = 0,9$. In rot sind diejenigen Bewegungsvektoren dargestellt, welche detektiert würden, wenn der Schwellenwert der LSQ-Methode so stark herabgesetzt wird, dass für den ganzen Tag gleich viele Bewegungsvektoren bestimmt werden, wie die LTS-Methode für diesen Tag ermittelt. Die zusätzlichen Messungen streuen stark und liegen vielfach unter 10 m/s, was auf Basis der übrigen Messungen fehlerhaft erscheint. Anhand dieses Beispielzeitraums soll gezeigt werden, dass lediglich durch eine Veränderung des Schwellenwerts der derzeit verwendeten LSQ-Methode zwar ebenso viele Bewegungsvektoren wie mit der LTS-Methode ermittelt werden können, die Qualität der Messungen darunter jedoch stark leiden würde.

Nachfolgend wird für die LTS-Methode untersucht, inwiefern die Streuung der Messungen von der Wahl des Schwellenwerts abhängt. Sofern die Streuung der Messwerte lediglich auf methodischen Messungenauigkeiten beruht, ist zu erwarten, dass Messungen mit sehr geringen Residuen weniger stark streuen. In Abbildung 3.22 sind die Geschwindigkeitsmessungen über dem korrespondierenden Residuum jeder Messung aufgetragen. Eingezeichnet ist ferner der gewählte Schwellenwert $\hat{r}_{LTS} = 0,1$. Die Abbildung zeigt, dass selbst Messungen mit äußerst kleinem Residuum signifikant streuen. Sogar Messungen, deren Residuum den gewählten Schwellenwert um etwa zwei Größenordnungen unterschreiten, streuen in einem Bereich von 12 bis 22 m/s. Dies lässt den Schluss zu, dass die Streuung der Messungen nicht nur auf Messungenauigkeiten zurückzuführen ist, sondern dass die Verschattungen selber sich erheblich voneinander unterscheiden. Ein Grund für diese Streuung ist die in der Realität nicht exakt gegebene Orthogonalität von Wolkenkante und

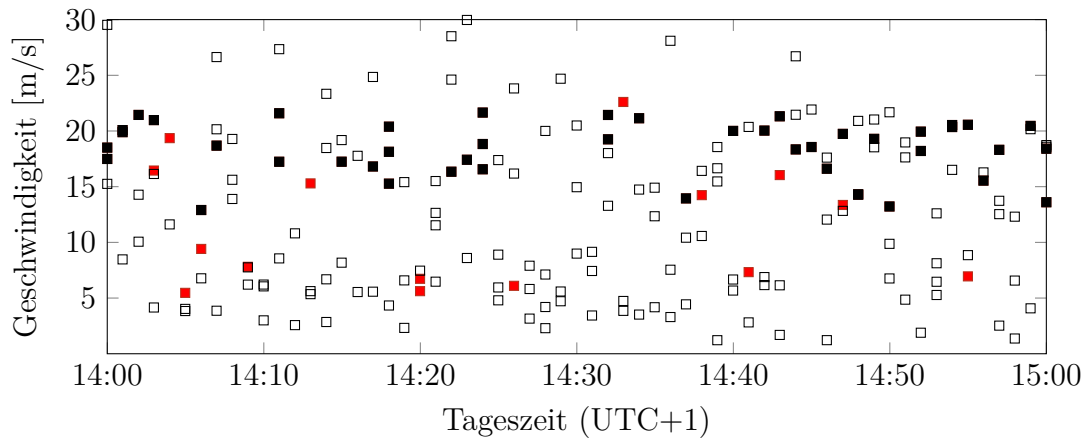


Abbildung 3.21: Für ein Zeitintervall von einer Stunde am 03.06.2016 ist die Auswahl der CSS Messungen auf Basis der Methode der kleinsten Quadrate dargestellt. Die schwarzen Quadrate stellen Messungen dar, welche dem derzeitig im CSS verwendeten Schwellenwert genügen. Die roten Quadrate zeigen Messungen eines weniger strengen Schwellenwerts. Dieser Schwellenwert würde für die Methode der kleinsten Quadrate gleich viele Messungen auswählen, wie die LTS-Methode für diesen Tag liefert. Diese zusätzlichen Messungen streuen jedoch stark und liegen vermehrt unterhalb von 10 m/s, was auf Basis der übrigen Messungen fehlerhaft erscheint. Die unausgefüllten Quadrate symbolisieren Berechnungen, welche auch bei dem weniger strengen Schwellenwert verworfen werden würden.

Bewegungsrichtung. Bei der verwendeten LCE-CF-Methode wird jedoch genau dies als zutreffend angenommen.

3.3 Orthogonalität von Bewegungsvektor und Wolkenkante

Im Folgenden wird der Frage nachgegangen, inwiefern die beobachteten Schattenkanten von Wolken orthogonal zur Bewegungsrichtung der Wolke verlaufen. Für die LCE-CF-Methode stellt diese Orthogonalität eine zentrale Annahme dar. Verläuft der Wolkenbewegungsvektor und die am Boden detektierte Schattenkante nicht orthogonal zueinander, wird die Geschwindigkeit des Schattens bei der LCE-CF-Methode stets um den Faktor $\cos(\delta)$ unterschätzt, wobei δ den Winkel zwischen dem Bewegungsvektor der Wolke und der Normalen der Schattenkante darstellt. Je größer dieser Winkel ist, desto größer ist der berechnete Fehler. Eine Einführung in die Thematik wird in Kapitel 2.3.4 gegeben. Im Folgenden wird quantitativ untersucht, inwiefern diese Annahme zutreffend ist. Dazu wird die Winkelabweichung zwischen Schattenkante und Bewegungsvektor quantitativ abgeschätzt. Außerdem wird darauf eingegangen, inwieweit sich die ermittelten Geschwindigkeiten der LCE-CF-Methode mit Hilfe einer als bekannt angenommenen Wolkenzugrichtung korrigieren lassen.

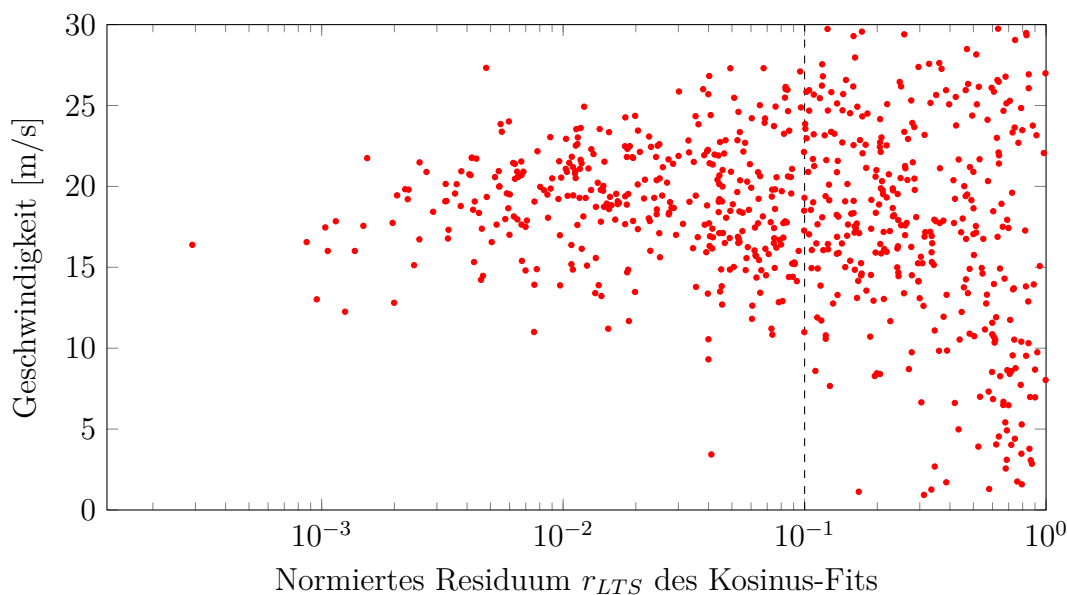


Abbildung 3.22: Dargestellt sind für die LTS-Methode die Geschwindigkeitsmessungen über ihrem normierten Residuum für alle Messungen am 03.06.2016. Eingezeichnet ist außerdem der gewählte Schwellenwert von $\hat{r}_{LTS} = 0,1$. Selbst Messungen, deren normiertes Residuum etwa zwei Größenordnungen unterhalb des gewählten Schwellenwerts liegen, streuen in einem Bereich von etwa 12 bis 22 m/s.

Die Frage, inwiefern die Schattenkanten orthogonal zur Wolkenbewegungsrichtung verlaufen, wurde bislang in der Literatur nicht abschließend beantwortet. In den nachfolgend referenzierten Arbeiten wird die LCE-Methode verwendet, um den Winkel zwischen Bewegungsvektor und Wolkenkante zu bestimmen. In Lappalainen u. Valkealahti (2016a) werden Bewegungsvektoren mit den zugehörigen Wolkenkanten für eine Datenbasis von 15 Monaten und etwa 12 000 Verschattungen verglichen. Die durchschnittliche Winkeldifferenz beträgt etwa 36° , wobei ein breites Spektrum zwischen 0° und 90° beobachtet wird. Eine Winkelabweichung von $\delta = 36^\circ$ führt zu einer Geschwindigkeitsunterschätzung von etwa 24 %. Es werden außerdem eine hohe Anzahl von Verschattungen mit $\delta > 85^\circ$ ermittelt. Ein derart großer Winkel würde jedoch bedeuten, dass die Bewegungsrichtung und die beobachtete Wolkenkante fast parallel zueinander stehen. Dieses Ergebnis wird nicht als physikalisch sinnvoll eingeschätzt. Die Verteilung sollte für $\delta \rightarrow 90^\circ$ gegen Null streben. Die Autoren ziehen den Schluss, dass zwar in den überwiegenden Fällen die Wolkenzugrichtung und die Wolkenkante etwa senkrecht zueinander stehen, jedoch nennenswerte Abweichungen existieren. In Bosch u. a. (2013) wird ebenfalls die Orthogonalität von Bewegungsvektor und Schattenkante untersucht. Die Autoren kommen zu dem Ergebnis, dass die Schattenkante meist senkrecht zur Wolkenzugrichtung steht. Die genaue Verteilung streue jedoch bedeutend und entspräche in etwa der Verteilung, wie sie durch perfekt kreisförmige Wolken hervorgerufen werden würde. Für das zur Verfügung stehende

Datenmaterial von 223 Tagen soll die Verteilung der Winkeldifferenz zwischen Bewegungsvektor und Schattenkante untersucht werden. Um möglichst aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten, werden Tage mit einer eindeutig vorherrschenden Richtung und scharf begrenzten Wolkenstrukturen (vor allem Kumuluswolken) ausgewählt. Mit Hilfe der eingeführten Bewölkungsklassen in Kapitel 3.1.2 können diese Tage automatisiert ausgewählt werden. Dazu werden jeweils die Verschattungen eines Tages den eingeführten Bewölkungsklassen zugeordnet. Anschließend werden Tage ausgewählt, an denen mehr als 30 % der Verschattungen weniger als 300 Sekunden andauern und gleichzeitig eine Verschattungsstärke von mindestens 30 % aufweisen. Ferner werden nur Tage ausgewählt, an denen mindestens 6 Verschattungen dieser Art beobachtet werden. Von den 223 Tagen werden auf diese Weise 59 Tage ausgewählt, welche insgesamt 2293 Verschattungen mit einer Schattenstärke von mehr als 30 % und einer Dauer von weniger als 300 Sekunden aufweisen. Zur Abbildung der Wolkenzugrichtung wird der 30-Minuten-Median der Richtungsmessungen herangezogen. Es wird erwartet, dass sich Wolken einer Höhe in die gleiche Richtung bewegen und sich diese zeitlich nur wenig ändert. Zu jedem Zeitpunkt wird daher der 30-Minuten-Median der Richtungsmessungen bestimmt, sofern mindestens 6 gültige Messungen im betrachteten 30-Minuten-Intervall zur Verfügung stehen. Ausgewertet wird die Richtungsdivergenz zwischen der Messung und dem 30-Minuten-Median. Die resultierende Verteilung ist in Abbildung 3.23 dargestellt. In rot dargestellt ist die Verteilung, wie sie von perfekt kreisförmigen Wolken erzeugt werden würde. Erwartungsgemäß ist in den meisten Fällen die Winkeldifferenz nahe Null, das heißt die Schattenkante steht senkrecht auf der Wolkenzugrichtung. In 77 % der Fälle beträgt der Winkel δ weniger als 30° . In weniger als 5 % der Fälle übersteigt die Winkeldifferenz 60° . Es werden große Abweichungen zur theoretischen Verteilung, welche durch perfekt kreisförmige Wolken erzeugt würden, beobachtet. Die gefundene Verteilung fällt für kleine Winkel wesentlich stärker ab, flacht jedoch ab etwa 45° zunehmend ab.

Im Folgenden wird überprüft, ob durch eine Korrektur der Geschwindigkeitsmessungen um den Faktor $(\cos \delta)^{-1}$ die Qualität der Ergebnisse gesteigert werden kann, was sich beispielsweise in einer verringerten Streuung zeigen könnte. Die Abhängigkeit des Korrekturterms ist in Abbildung 3.24 dargestellt. Für kleine Winkelabweichungen fällt die Korrektur sehr gering aus. Bei $\delta = 30^\circ$ beträgt der Korrekturfaktor rund 15 %. Ab einem Winkel von 50° steigt der Verlauf stark an und geht für $\delta \rightarrow 90^\circ$ gegen unendlich. Zur Korrektur der Geschwindigkeiten ist es erforderlich die tatsächlich vorherrschende Wolkenzugrichtung zu kennen. Da die reale Wolkenzugrichtung jedoch unbekannt ist und naturgemäß Schwankungen unterliegt, muss ersatzweise eine Wolkenzugrichtung berechnet werden, welche der tatsächlichen Richtung möglichst genau entspricht. Hierfür wird erneut ein 30-Minuten-Median verwendet. Es wird erwartet, dass sich die gemessene Wolkenzugrichtung zeitlich nur geringfügig ändert, vorausgesetzt es existiert nur eine Wolkenschicht. Für den Beispieltag 03.06.2016 wird erwartet, dass die gemittelte Wolkenzugrichtung recht exakt ist, da sehr viele Messungen zur Mittelung vorliegen und der Bewegungsvektor über den gesamten

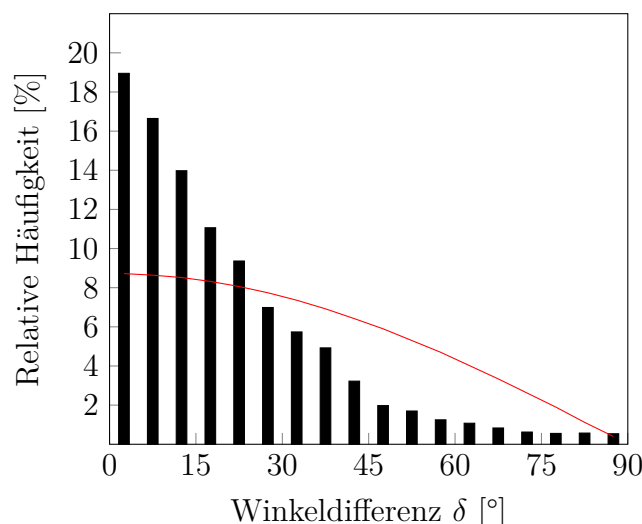


Abbildung 3.23: Verteilung der Winkeldifferenz δ zwischen Bewegungsvektor und Schattenkante für 59 ausgewählte Tage. An diesen Tagen werden vor allem kleine, scharf berandete Wolken geringer Transmissivität beobachtet. Die Daten sind zu Intervallen von 5° subsumiert. Rot eingezeichnet ist eine theoretische Verteilung, welche durch perfekt kreisförmige Wolken erzeugt werden würde.

Tag nahezu konstant ist. In Abbildung 3.25 ist das Ergebnis dieser Winkelkorrektur für ein Zeitintervall von 3 Stunden am 03.06.2016 dargestellt. In der unteren Abbildung sind die Richtungsmessungen in rot eingezeichnet. Die grün eingezeichneten, korrigierten Richtungsmessungen entsprechen dem 30-Minuten-Median. In der oberen Abbildung sind die Geschwindigkeitsmessungen in rot dargestellt. Diese werden um den Faktor $(\cos \delta)^{-1}$ korrigiert. Der Winkel δ entspricht der Winkeldifferenz zwischen der Richtungsmessung (rot) und der gemittelten Richtung (grün) in der unteren Abbildung. Die Häufigkeitsverteilung aller Winkeldifferenzen ist in Abbildung 3.26 dargestellt. Die korrigierten Geschwindigkeiten (grün) liegen gemäß des formelmäßigen Zusammenhangs stets über den gemessenen Geschwindigkeiten. Um die Korrektur möglichst gut evaluieren zu können, werden in diesem Beispiel lediglich Messungen betrachtet, deren Residuum des Kosinus-Fits kleiner als ein Zehntel des Schwellenwerts beträgt. Es wird erwartet, dass diese Messungen sehr genau sind. Auf diese Weise wird vermieden, dass Ungenauigkeiten bei der Messmethode das Ergebnis der Korrektur beeinflussen. Bei Betrachtung der korrigierten Geschwindigkeiten fällt auf, dass diese weniger streuen als die gemessenen Geschwindigkeiten. Insbesondere wird bei Ausreißern, deren Geschwindigkeit sehr niedrig ausfällt, die Geschwindigkeit stark nach oben korrigiert. Dies ist zum Beispiel um 14:06 Uhr der Fall. Die gemessene Geschwindigkeit beträgt hier 12,8 m/s, die gemessene Richtung $188,1^\circ$. Der 30-Minuten-Median der Richtungen beträgt zu diesem Zeitpunkt jedoch $243,8^\circ$, was einer Winkelabweichung von $\delta = |188,1^\circ - 243,8^\circ| = 55,7^\circ$ entspricht.

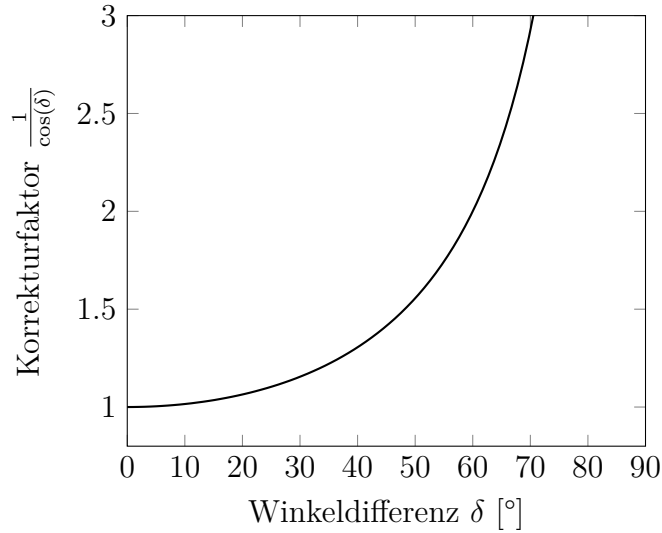


Abbildung 3.24: Dargestellt ist die Abhängigkeit des Korrekturfaktors für die Geschwindigkeitsmessung $\frac{1}{\cos(\delta)}$ von der Winkeldifferenz δ zwischen Bewegungsvektor und Schattenkante.

Die korrigierte Geschwindigkeit beträgt folglich

$$v_c = \frac{12,8 \text{ m/s}}{\cos(55,7^\circ)} = 22,75 \text{ m/s} \quad (3.19)$$

Dieser Geschwindigkeitsbetrag reiht sich deutlich plausibler in die vorherrschende Wolkengeschwindigkeit zu diesem Zeitpunkt ein. Weitere Beispiele finden sich zu den Zeitpunkten 12:56 Uhr und 12:00 Uhr: Hier wird die gemessene Geschwindigkeit von 14,5 m/s auf 22,1 m/s beziehungsweise von 11,0 m/s auf 21,36 m/s korrigiert. Mit dem hier vorgestellten Ansatz besteht jedoch die Gefahr, Geschwindigkeiten zu überschätzen, wenn die Richtung großen Unsicherheiten unterliegt. Ist die Richtungsmessung stark fehlerbehaftet und weicht stark vom 30-Minuten-Median ab, kann es dazu kommen, dass die Geschwindigkeit stark überschätzt wird. In dem betrachteten Zeitintervall kommt es jedoch bei keiner Messung dazu, dass die Geschwindigkeit unphysikalisch stark nach oben korrigiert wird. Messungen mit einer großen Geschwindigkeit, weisen geringe Winkelabweichungen auf und werden daher nur um einen geringen Betrag korrigiert. Zusammenfassend bietet der vorgestellte Ansatz zur Geschwindigkeitskorrektur eine weitere Möglichkeit die Präzision der vom CSS durchgeführten Messungen weiter zu erhöhen. Durch die Korrektur der Geschwindigkeiten wird die methodische Schwäche, dass die Schattenkante und die Wolkenzugrichtung orthogonal zueinander stehen müssen, teilweise kompensiert. Da die Methodik jedoch nur bei einer zeitlich konstanten Wolkenzugrichtung und scharf berandeten Wolken erfolgversprechend ist, wird diese bei der Berechnung der Wolkenhöhen in Kapitel 4 nicht angewendet.

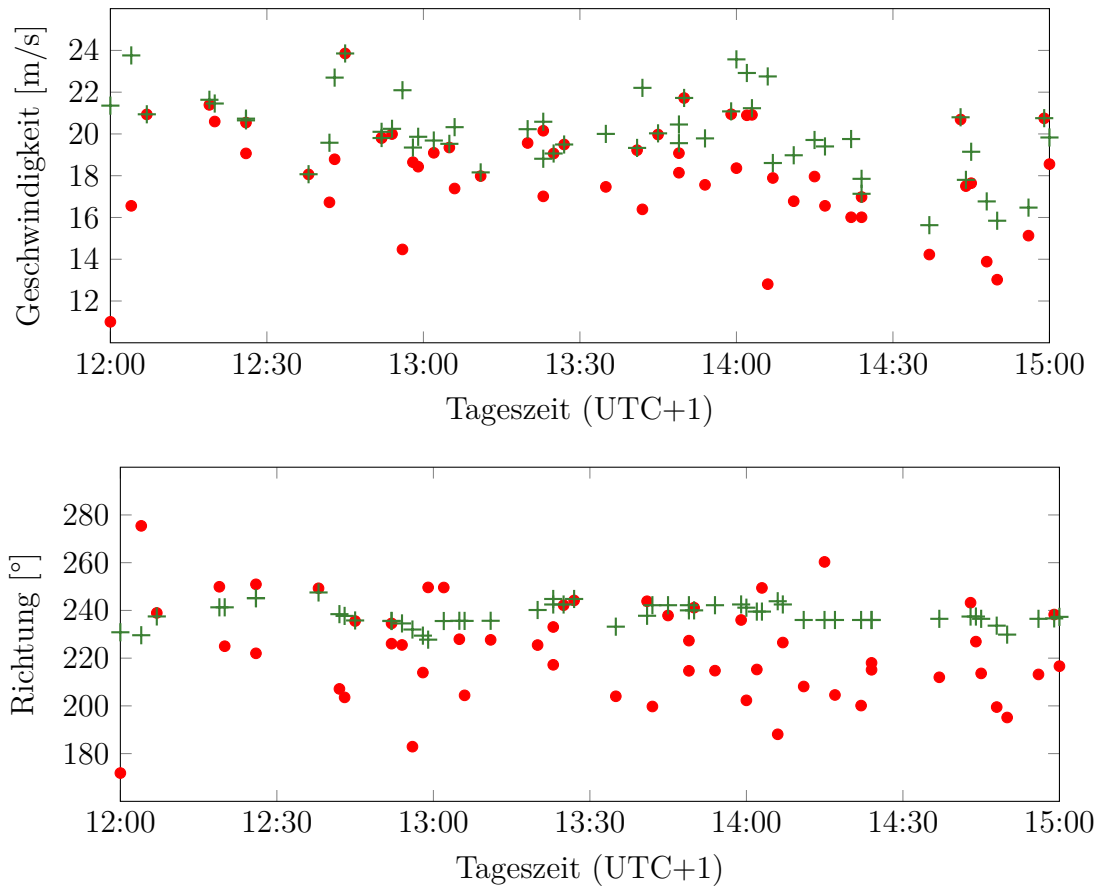


Abbildung 3.25: Dargestellt sind in rot die mit der LTS-Methode bestimmten Geschwindigkeits- und Richtungsmessungen für ein Zeitintervall von 3 Stunden. In grün dargestellt sind die korrigierten Messwerte.

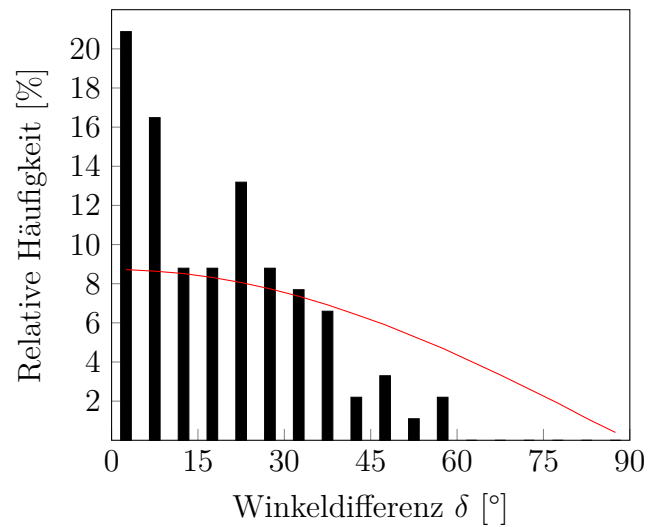


Abbildung 3.26: Dargestellt ist die Häufigkeitsverteilung der Winkeldifferenz δ der in Abbildung 3.25 dargestellten Richtungen (12:00 bis 15:00 Uhr am 03.06.2016). Die Messungen sind zu Intervallen von 5° subsumiert. Rot eingezeichnet ist die theoretische Verteilung, welche perfekt kreisförmige Wolken erzeugen würden.

4 Wolkenhöhenbestimmung mittels CSS-Kamera-System

In diesem Kapitel wird ein System zur Wolkenhöhenbestimmung vorgestellt, welches eine Wolkenkamera sowie einen *Cloud Shadow Speed Sensor* (CSS) umfasst und daher als *CSS-Kamera-System* bezeichnet wird. In Abschnitt 4.1 wird zunächst die zu Grunde liegende Idee vorgestellt und die zentrale Berechnungsgleichung hergeleitet. Im darauffolgenden Abschnitt 4.2 wird die konkrete Implementierung vorgestellt. In Abschnitt 4.3 werden die Ergebnisse anhand von 70 ausgewerteten Tagen vorgestellt. Im letzten Abschnitt 4.4 werden Fehlerursachen diskutiert.

4.1 Herleitung der Bestimmungsgleichung

Im Folgenden wird erläutert, wie mit Hilfe von zwei Wolkenkamerabildern sowie einer Information über die Wolkengeschwindigkeit die Wolkenhöhe berechnet werden kann. Dies wird zunächst an einem 2-dimensionalen Sonderfall erläutert. Das Messprinzip ist in Abbildung 4.1 skizziert. Dargestellt ist eine Wolke zu zwei unterschiedlichen Zeitpunkten t_1 und t_2 . Die Wolke bewegt sich mit dem Bewegungsvektor v . Ein markanter Punkt der Wolke, in diesem Beispiel die vordere Wolkenkante, wird verfolgt und der Winkel zwischen Zenit und Wolkenkante wird für beide Zeitpunkte ermittelt. Als Eingangsgrößen für die Höhenberechnung stehen die Winkelinformationen, die Geschwindigkeit der Wolke $|v|$ sowie der zeitliche Abstand Δt der Winkelmessungen zur Verfügung. Ausgehend von den geometrischen Beziehungen

$$\tan(\beta_1) = \frac{d_1}{h} \quad (4.1)$$

und

$$\tan(\beta_2) = \frac{d_2}{h} \quad (4.2)$$

sowie der kinematischen Beziehung

$$d_2 = d_1 - v\Delta t \quad (4.3)$$

kann die Bestimmungsgleichung

$$h = \frac{v\Delta t}{\tan(\beta_1) - \tan(\beta_2)} \quad (4.4)$$

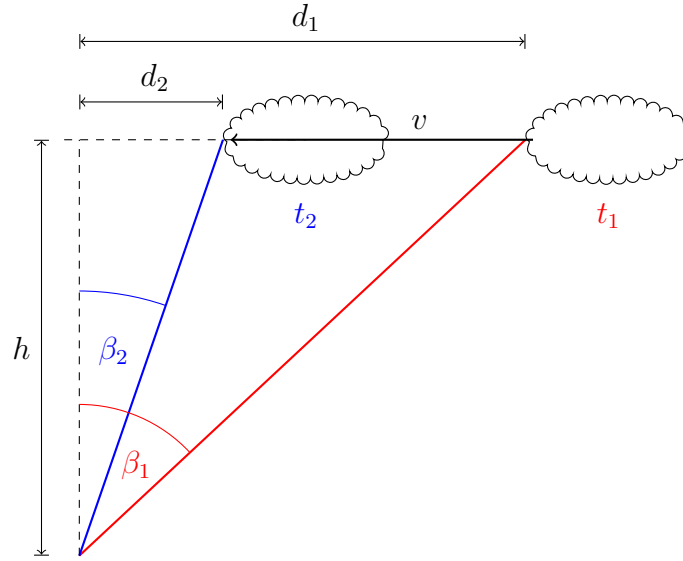


Abbildung 4.1: Dargestellt ist die Position einer Wolke zu zwei Zeitpunkten t_1 und t_2 . Mit Hilfe der Wolkengeschwindigkeit $|v|$ und zweier Winkelmessungen ist es möglich, die Wolkenhöhe h zu bestimmen.

hergeleitet werden. Der in Abbildung 4.1 dargestellte Zusammenhang stellt den 2-dimensionalen Sonderfall dar. Bei einer 3-dimensionalen Betrachtung wird die Verschiebung der Wolke durch zwei Winkelpaare aus Azimut und Elevation beschrieben. Die zugehörige Prinzipskizze ist in Abbildung 4.2 dargestellt. Die Wolke zieht vom Ortsvektor u_1 während des Zeitintervalls Δt zum Punkt u_2 . Zentrale Annahme ist, dass für beide Punkte der Abstand zur x-y-Ebene, das heißt die Wolkenhöhe h , gleich ist. Diese Annahme setzt voraus, dass sich die Wolkenhöhe im Zeitintervall zwischen den beiden Messungen nicht signifikant ändert. In Anlehnung an Gleichung 4.3 im 2-dimensionalen Fall wird für den 3-dimensionalen Fall die kinematische Beziehung

$$v\Delta t = |u_1 - u_2| \quad (4.5)$$

formuliert, wobei v die Wolkengeschwindigkeit und Δt die Zeit zwischen den Winkelmessungen darstellt. Die Vektoren u_1 und u_2 können im gewählten Koordinatensystem durch

$$u_i = \sqrt{d_i^2 + h^2} \begin{pmatrix} \sin(\alpha_i) \cos(\gamma_i) \\ \cos(\alpha_i) \cos(\gamma_i) \\ \sin(\gamma_i) \end{pmatrix} \quad \forall i \in \{1, 2\} \quad (4.6)$$

ausgedrückt werden, wobei d_i die Länge der Projektion der Vektoren u_i in der x-y-Ebene darstellt. α_i und γ_i beschreiben den Azimut- beziehungsweise Elevationswinkel. Durch Einsetzen der Gleichungen 4.6 in Gleichung 4.5 ergibt sich

$$\Leftrightarrow v\Delta t = \left| \sqrt{d_1^2 + h^2} \begin{pmatrix} \sin(\alpha_1) \cos(\gamma_1) \\ \cos(\alpha_1) \cos(\gamma_1) \\ \sin(\gamma_1) \end{pmatrix} - \sqrt{d_2^2 + h^2} \begin{pmatrix} \sin(\alpha_2) \cos(\gamma_2) \\ \cos(\alpha_2) \cos(\gamma_2) \\ \sin(\gamma_2) \end{pmatrix} \right| \quad (4.7)$$

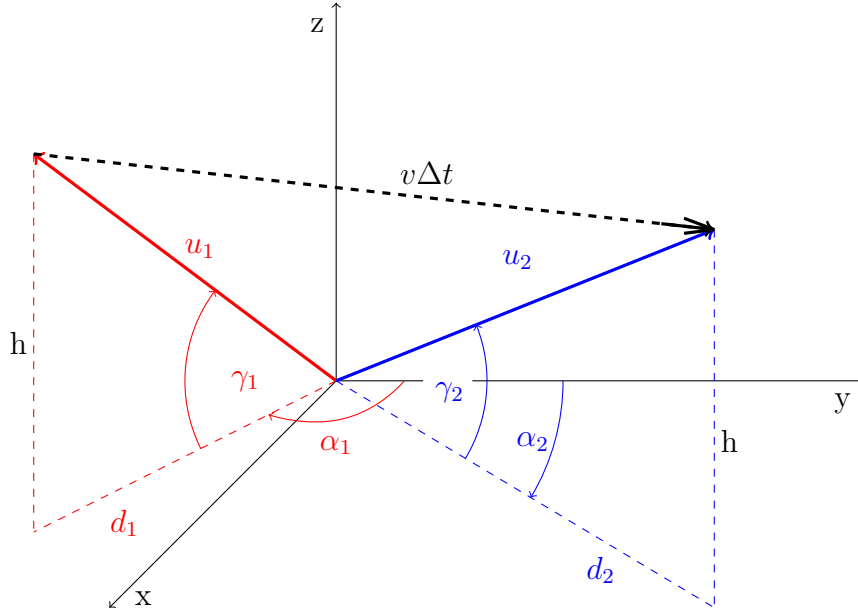


Abbildung 4.2: Dargestellt sind zwei Ortsvektoren u_1 und u_2 , deren Richtung durch zwei Winkelpaare aus Azimuth (α) und Elevation (γ) charakterisiert sind. Sie beschreiben einen Punkt auf der zu vermessenden Wolke zu zwei Zeitpunkten t_1 und t_2 . Der Verbindungsvektor zwischen den beiden Positionen, kann durch das Produkt aus Geschwindigkeitsvektor v und Zeitabstand zwischen den beiden Zeitpunkten Δt ausgedrückt werden. Sind die Wolkengeschwindigkeit, die beiden Winkelpaare sowie der Zeitabstand bekannt, ist es möglich, die Wolkenhöhe zu bestimmen.

Die Betragsfunktion wird mit Hilfe des Satzes von Pythagoras zu

$$\Leftrightarrow v\Delta t = \left[\left(\sqrt{d_1^2 + h^2} \sin(\alpha_1) \cos(\gamma_1) - \sqrt{d_2^2 + h^2} \sin(\alpha_2) \cos(\gamma_2) \right)^2 + \left(\sqrt{d_1^2 + h^2} \cos(\alpha_1) \cos(\gamma_1) - \sqrt{d_2^2 + h^2} \cos(\alpha_2) \cos(\gamma_2) \right)^2 + \left(\sqrt{d_1^2 + h^2} \sin(\gamma_1) - \sqrt{d_2^2 + h^2} \sin(\gamma_2) \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4.8)$$

aufgelöst. Die projizierte Länge d_i wird mit der Wolkenhöhe h und dem Elevationswinkel γ durch

$$d_i^2 = \frac{h^2}{\tan^2 \gamma_i} \quad \forall i \in \{1, 2\} \quad (4.9)$$

ersetzt. Werden die Gleichungen 4.9 in Gleichung 4.8 eingesetzt ergibt sich

$$v\Delta t = \left[\left(\sqrt{\frac{h^2}{\tan^2 \gamma_1} + h^2 \sin(\alpha_1) \cos(\gamma_1)} - \sqrt{\frac{h^2}{\tan^2 \gamma_2} + h^2 \sin(\alpha_2) \cos(\gamma_2)} \right)^2 + \left(\sqrt{\frac{h^2}{\tan^2 \gamma_1} + h^2 \cos(\alpha_1) \cos(\gamma_1)} - \sqrt{\frac{h^2}{\tan^2 \gamma_2} + h^2 \cos(\alpha_2) \cos(\gamma_2)} \right)^2 + \left(\sqrt{\frac{h^2}{\tan^2 \gamma_1} + h^2 \sin(\gamma_1)} - \sqrt{\frac{h^2}{\tan^2 \gamma_2} + h^2 \sin(\gamma_2)} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4.10)$$

Durch teilweise Wurzelziehen sowie Ausklammern der Höhe h ergibt sich

$$\Leftrightarrow v\Delta t = h \left[\left(\sqrt{\frac{1}{\tan^2 \gamma_1} + 1 \sin(\alpha_1) \cos(\gamma_1)} - \sqrt{\frac{1}{\tan^2 \gamma_2} + 1 \sin(\alpha_2) \cos(\gamma_2)} \right)^2 + \left(\sqrt{\frac{1}{\tan^2 \gamma_1} + 1 \cos(\alpha_1) \cos(\gamma_1)} - \sqrt{\frac{1}{\tan^2 \gamma_2} + 1 \cos(\alpha_2) \cos(\gamma_2)} \right)^2 + \left(\sqrt{\frac{1}{\tan^2 \gamma_1} + 1 \sin(\gamma_1)} - \sqrt{\frac{1}{\tan^2 \gamma_2} + 1 \sin(\gamma_2)} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4.11)$$

Diese Gleichung wird schließlich zur gesuchten Wolkenhöhe h umgestellt:

$$\Leftrightarrow h = v\Delta t \left[\left(\sqrt{\frac{1}{\tan^2 \gamma_1} + 1 \sin(\alpha_1) \cos(\gamma_1)} - \sqrt{\frac{1}{\tan^2 \gamma_2} + 1 \sin(\alpha_2) \cos(\gamma_2)} \right)^2 + \left(\sqrt{\frac{1}{\tan^2 \gamma_1} + 1 \cos(\alpha_1) \cos(\gamma_1)} - \sqrt{\frac{1}{\tan^2 \gamma_2} + 1 \cos(\alpha_2) \cos(\gamma_2)} \right)^2 + \left(\sqrt{\frac{1}{\tan^2 \gamma_1} + 1 \sin(\gamma_1)} - \sqrt{\frac{1}{\tan^2 \gamma_2} + 1 \sin(\gamma_2)} \right)^2 \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (4.12)$$

Der Vollständigkeit halber soll die finale Gleichung 4.12 in Gleichung 4.4 überführt werden, unter der Voraussetzung, dass die Azimutwinkel α_1 und α_2 identisch Null sind. Mit dieser Annahme vereinfacht sich Gleichung 4.12 zu

$$\Leftrightarrow h = v\Delta t \left[\left(\sqrt{\frac{1}{\tan^2 \gamma_1} + 1 \cos(\gamma_1)} - \sqrt{\frac{1}{\tan^2 \gamma_2} + 1 \cos(\gamma_2)} \right)^2 + \left(\sqrt{\frac{1}{\tan^2 \gamma_1} + 1 \sin(\gamma_1)} - \sqrt{\frac{1}{\tan^2 \gamma_2} + 1 \sin(\gamma_2)} \right)^2 \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (4.13)$$

Dieser Ausdruck wird mit Hilfe von

$$\sqrt{\frac{1}{\tan^2 \gamma_i} + 1} = \sqrt{\frac{1}{\frac{\sin^2 \gamma_i}{\cos^2 \gamma_i} + 1}} = \sqrt{\frac{\cos^2 \gamma_i}{\sin^2 \gamma_i} + \frac{\sin^2 \gamma_i}{\sin^2 \gamma_i}} = \left| \frac{1}{\sin \gamma_i} \right| \quad (4.14)$$

und der Annahme, dass $\gamma_i \in [0, 180^\circ]$ gilt, zu

$$\Leftrightarrow h = v\Delta t \left[\left(\frac{1}{\sin \gamma_1} \cos(\gamma_1) - \frac{1}{\sin \gamma_2} \cos(\gamma_2) \right)^2 + \left(\frac{1}{\sin \gamma_1} \sin(\gamma_1) - \frac{1}{\sin \gamma_2} \sin(\gamma_2) \right)^2 \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (4.15)$$

vereinfacht. Der zweite Summand fällt augenscheinlich weg, sodass

$$\Leftrightarrow h = \frac{v\Delta t}{\frac{1}{\sin \gamma_1} \cos(\gamma_1) - \frac{1}{\sin \gamma_2} \cos(\gamma_2)} \quad (4.16)$$

verbleibt. Wird nun $\gamma_i = 90^\circ - \beta_i$ in Gleichung 4.16 eingesetzt sowie die Beziehungen $\cos(90^\circ - \beta_i) = \sin(\beta_i)$ und $\sin(90^\circ - \beta_i) = \cos(\beta_i)$ verwendet ergibt sich der Ausdruck aus Gleichung 4.4

$$\Leftrightarrow h = \frac{v\Delta t}{\tan(\beta_1) - \tan(\beta_2)} \quad (4.17)$$

4.2 Implementierung

Im Folgenden wird der in MATLAB® entwickelte Algorithmus zur Wolkenhöhenbestimmung beschrieben. Eine der beiden zentralen Größen zur Höhenbestimmung stellt die Wolkengeschwindigkeit dar. Diese wird aus Messungen des *Cloud Shadow Speed Sensors* (CSS) ermittelt. Der zeitliche Abstand zwischen zwei CSS-Messungen variiert stark je nach vorherrschender Bewölkungssituation. An einigen Tagen werden minütlich Messungen registriert, an anderen Tagen trotz geeigneter Bewölkung gar keine. Darüber hinaus streuen die Geschwindigkeitsmessungen des CSS signifikant (vergleiche Kapitel 3.2). Um den Einfluss der Messungenauigkeiten zu verringern, wird, wie ebenfalls in Fung u. a. (2013) vorgeschlagen, der Median der CSS-Messungen innerhalb des vorangegangenen 30-Minuten-Intervalls berechnet. Dieser Mittelwert wird als Eingangsgröße für die Höhenberechnung verwendet. Ferner wird die Höhenmessung nur durchgeführt, wenn mindestens drei CSS-Messungen für die Medianberechnung zur Verfügung stehen. Dadurch werden fehlerbehaftete Höhenmessungen vermieden, die auf wenigen, unpräzisen CSS-Messungen basieren.

Neben der Wolkengeschwindigkeit ist die Ermittlung der beiden Winkelpaare aus Azimut und Elevation die zweite zentrale Größe bei der Bestimmung der Wolkenhöhe. Bei der Bestimmung dieser Winkel werden zwei aufeinanderfolgende Wolkenkamerabilder verwendet. Die Wolkenkamera ist 1,5 Meter neben dem CSS installiert. Die Kamerabilder werden in einem ersten Schritt segmentiert. Dies bedeutet, dass bewölkte Bildbereiche identifiziert werden. Für die Segmentierung wird eine Clear-Sky-Datenbank verwendet. In dieser sind die RGB-Werte für einen unbewölkten Himmel abhängig von der Linken Trübung, dem Sonnenstand und der optischen

Luftmasse abgelegt. Für jedes Pixel des aufgenommenen Bilds werden die RGB-Werte mit den in der Datenbank hinterlegten RGB-Werten verglichen. Bei kleinen Differenzen wird das Pixel als Himmel identifiziert, bei großen Differenzen als Wolke. Das Ergebnis einer beispielhaften Segmentierung ist in Abbildung 4.3 dargestellt. Oben links ist das aufgenommene Wolkenkamerabild dargestellt. Die Abbildung rechts oben zeigt das Ergebnis der Segmentierung: Dunkelblaue Bereiche sind Teile der Maske, welche unbrauchbare Bildbereiche, wie die Berandung des Wolkenkamerabilds oder fest-installierte Objekte, ausschneidet. Die als Himmel klassifizierten Pixel sind in hellblau dargestellt, die als Wolken klassifizierten Pixel in gelb. Auf diesem segmentierten Beispielbild wird ein schmaler ringförmiger Bereich um die Sonne fälschlicherweise ebenfalls als Wolke klassifiziert. In einem zweiten Schritt werden die mit einem Fischaugenobjektiv aufgenommenen Wolkenkamerabilder in eine orthogonale Perspektive umgewandelt. Der Hauptgrund für diese Entzerrung ist, dass aus Bildern mit orthogonaler Perspektive die Wolkenbewegung besser abgeschätzt werden kann (Huang u. a. (2011)). Das untere Bild in Abbildung 4.3 zeigt das segmentierte Wolkenkamerabild nach der Entzerrung.

Aus zwei aufeinander folgenden Wolkenkamerabildern wird anschließend die Bewegung der Wolken erfasst. Dazu wird die Phasenkorrelation, welche in Kapitel 2.4 näher beschrieben ist, als robustes und effizientes Berechnungsverfahren verwendet. Der verwendete Algorithmus basiert auf Lewis (1995). Die Phasenkorrelation wird auf einen quadratischen Bildausschnitt in der Mitte des Bildes angewendet. In diesem Bildausschnitt befinden sich Wolken, die vom Ceilometer erfasst werden. Die Ränder des Bildausschnitts entsprechen einem Elevationswinkel von $53,1^\circ$ (Mittelpunkt einer Kante) beziehungsweise $43,3^\circ$ (Eckpunkt). Das Ergebnis der Phasenkorrelation ist ein 2-dimensionaler Translationsvektor, der die mittlere Verschiebung der Wolkenobjekte im Bildausschnitt beschreibt. Aus dem Translationsvektor lässt sich jedoch kein Anfangs- und Endpunkt einer konkreten Wolkenbewegung ableiten. Wie zu Beginn des Kapitels erläutert, ist die Grundidee der Methode jedoch, zu einer konkreten Trajektorie Azimut- und Elevationswinkel des Anfangs- und Endpunkts zu bestimmen. Es wird daher eine theoretische Bewegung angenommen, bei der sich die Wolke über das mittlere Pixel des Bildausschnitts bewegen würde. Theoretisch hat die absolute Positionierung der Trajektorie im Bildausschnitt keinen Einfluss auf die berechnete Wolkenhöhe. Bei der praktischen Umsetzung zeigen sich geringe Abweichungen. Dies wird an einer beispielhaften Berechnung veranschaulicht. In Abbildung 4.4 sind drei beliebige Positionierungen des Translationsvektors dargestellt. Der grüne Pfeil symbolisiert den mittig im Bild ausgerichteten Translationsvektor. Die drei roten Pfeile symbolisieren drei alternative, beliebige Positionierungen. Beginn und Ende der Translationsvektoren sind jeweils gelb hervorgehoben. Bei der mittigen Positionierung betragen die Winkelpaare

$$\alpha_1 = -149,3^\circ, \gamma_1 = 85,1^\circ \text{ sowie } \alpha_2 = 33,8^\circ, \gamma_2 = 86,7^\circ \quad (4.18)$$

Die Wolkenhöhe wird zu 4275 m berechnet. Bei den drei alternativen Positionierungen unterscheiden sich die einzelnen Winkel deutlich, die ermittelten Höhen sind jedoch

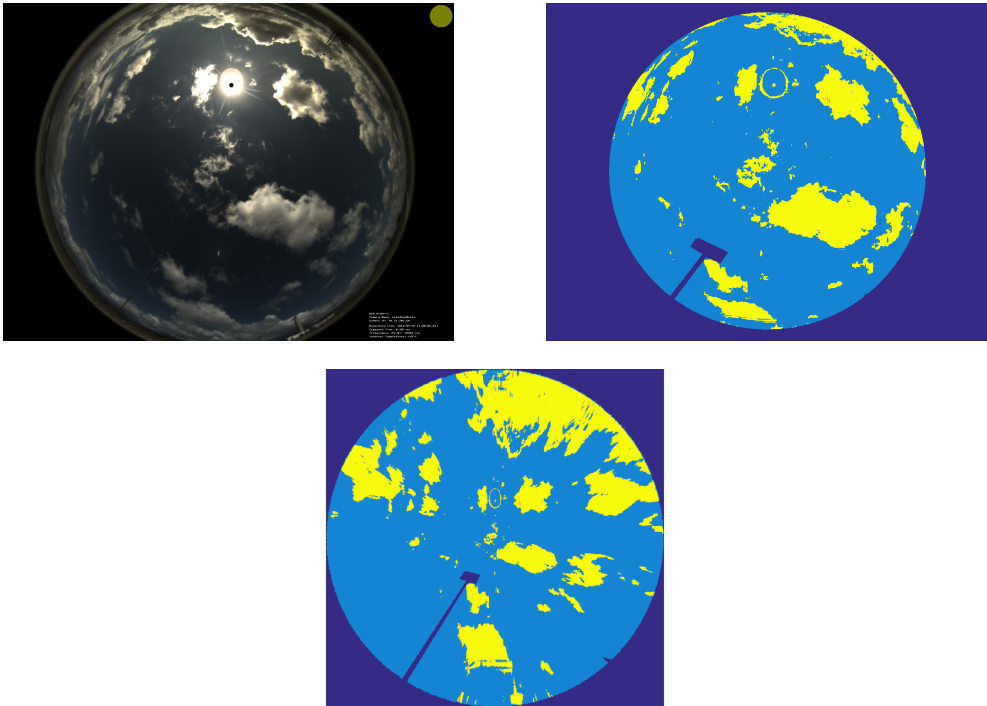


Abbildung 4.3: Dargestellt ist oben links das aufgenommene Wolkenkamerabild. Rechts oben ist das Ergebnis der Segmentierung dargestellt. Dunkelblaue Bereiche stellen Teile der Maske dar. Die als Himmel klassifizierte Pixel sind in hellblau dargestellt, die als Wolken klassifizierte Pixel in gelb. Das untere Bild zeigt das segmentierte Wolkenkamerabild nach der Umwandlung in eine orthogonale Perspektive.

sehr ähnlich: Die Winkelpaare für die Positionierung P1 betragen

$$\alpha_1 = -120,1^\circ, \gamma_1 = 53,4^\circ \text{ sowie } \alpha_2 = -114,1^\circ, \gamma_2 = 58,2^\circ \quad (4.19)$$

Die Wolkenhöhe wird bei der Positionierung P1 zu 4310 m berechnet und weicht damit nur um 35 m ab. Ein ähnliches Ergebnis ergibt sich bei den anderen beiden Positionierungen: Bei Positionierung P2 wird die Wolkenhöhe zu 4375 m und bei der Positionierung P3 zu 4345 m bestimmt. Die Abweichungen liegen für dieses Beispiel innerhalb eines Intervalls von 100 m, was einer relativen Schwankung von etwa 2,4 % entspricht.

Mit Hilfe der beiden Winkelpaare aus Azimut und Elevation wird gemeinsam mit der gemittelten Wolkengeschwindigkeit des CSS die Wolkenhöhe gemäß Formel 4.12 berechnet. Wird eine Höhe von mehr als 15 km ermittelt, wird die Messung verworfen, da Wolkenhöhen von über 15 km in der Praxis nur äußerst selten vorkommen und das Ceilometer gemäß Herstellerangaben lediglich Wolken bis zu einer Höhe von 15 km detektiert. Für Kurzfristvorhersagesysteme sind Wolken über dieser Höhe außerdem wenig relevant. Wenn der ermittelte Translationsvektor dem Nullvektor entspricht oder der Bewölkungsgrad innerhalb des Bildausschnitts 5 % unter- oder

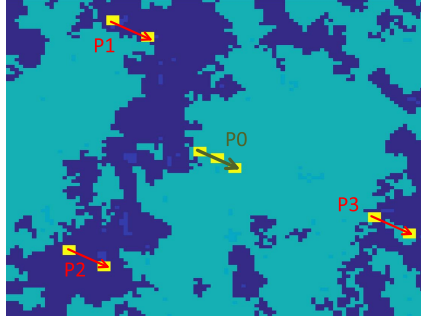


Abbildung 4.4: Dargestellt sind 4 unterschiedliche Positionierungen des Translationsvektors im segmentierten, entzerrten Kamerabild (Zeitpunkt: 11:19 Uhr am 03.06.2016).

95 % überschreitet, wird ebenfalls keine Wolkenhöhe ausgegeben.

Die Wolkengeschwindigkeit und Richtung ändert sich innerhalb kleiner Zeitintervalle von wenigen Minuten nur geringfügig. Folglich sollte sich auch der berechnete Translationsvektor nur geringfügig von einem Bildpaar zum nächsten verändern. Kommt es jedoch zu einer fehlerhaften Berechnung des Translationsvektors beispielsweise aufgrund von Segmentierungsfehler, ändert sich der Translationsvektor zwischen zwei Auswertungen abrupt. Es wird daher eine Kennzahl eingeführt, die die Schwankung der Translationsvektoren über die letzten k Berechnungsschritte widerspiegelt. Übersteigt diese Kennzahl einen bestimmten Schwellenwert, wird die Berechnung verworfen. Diese Kennzahl soll es ermöglichen, verschiedene Berechnungsfehler verlässlich zu detektieren und fehlerbehaftete Höhenberechnungen zu eliminieren. Es kann davon ausgegangen werden, dass zufällige Fehlereinflüsse die Varianz der x- und y-Koordinaten der letzten k Translationsvektoren erhöhen. Wird für mehrere Berechnungsschritte hingegen ein nahezu identischer Translationsvektor bestimmt, kann mit einer hohen Wahrscheinlichkeit davon ausgegangen werden, dass dieser präzise ist und eine Wolkenhöhenberechnung wird durchgeführt. Als Maß für die Streuung des Translationsvektors wird daher die Kennzahl Γ eingeführt. Zur Definition werden die Standardabweichungen der letzten x- beziehungsweise y-Koordinaten des Translationsvektors herangezogen. Diese werden mit der Länge der Translationsvektoren normiert. Die Kennzahl ergibt sich damit zu

$$\Gamma = \frac{\sqrt{\sigma_{x,k}^2 + \sigma_{y,k}^2}}{\sum_{i=1}^k \sqrt{T_{x,i}^2 + T_{y,i}^2}} \quad (4.20)$$

wobei $T_{x,i}$ und $T_{y,i}$ die x- und y-Koordinaten der letzten k Translationsvektoren beschreiben und $\sigma_{x,k}$ sowie $\sigma_{y,k}$ die Standardabweichungen der entsprechenden Koordinaten. Überschreitet die Gütekennzahl Γ für einen Berechnungsschritt einen Schwellenwert $\hat{\Gamma}$ wird die Höhenberechnung verworfen. Der Schwellenwert wird empirisch zu $\hat{\Gamma} = 0,05$ festgelegt.

4.3 Ergebnisse

Das für die Höhenberechnung zur Verfügung stehende Datenmaterial umfasst den Zeitraum vom 20.03.2016 bis 31.01.2017 (318 Tage). Für diesen Zeitraum werden 70 Tage ausgewählt. Wolkenlose oder durchgehend bedeckte Tage werden nicht betrachtet. Ebenso werden nur Tage berücksichtigt, an denen CSS-Messungen verfügbar sind und kein Datenausfall eines der Komponenten (Ceilometer, CSS, Wolkenkamera) vorliegt. Die verwendeten CSS-Geschwindigkeiten basieren bei den nachfolgend vorgestellten Ergebnissen auf dem in Abschnitt 3.2 erarbeiteten verbesserten Berechnungsalgorithmus für den CSS. Die Validierung der ermittelten Wolkenhöhen des CSS-Kamera-Systems erfolgt mit Hilfe eines Ceilometers, welches 7 Meter neben der Wolkenkamera installiert ist. Als Ceilometer-Messung wird stets die Wolkenbasishöhe (engl. *cloud-base height*) der untersten Schicht verwendet. Für die Validierung werden die Messungen des CSS-Kamera-Systems mit Ceilometer-Messungen verglichen, welche innerhalb einer zeitlichen Toleranz von einer Minute mit dem Messzeitpunkt des CSS-Kamera-Systems übereinstimmen. Sofern mehrere Ceilometer-Messungen innerhalb dieses Zeitintervalls existieren, werden diese arithmetisch gemittelt. CSS-Kamera-Messungen, zu denen keine Ceilometer-Messung vorliegt, werden bei der statistischen Auswertung nicht berücksichtigt. Zu allen N Messpaaren aus Ceilometer-Messung C_i und Messung des CSS-Kamera-Systems h_i werden der mittlere Fehler

$$\text{BIAS} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (h_i - C_i) \quad (4.21)$$

der mittlere quadratische Fehler (engl. *root mean square error*)

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (h_i - C_i)^2} \quad (4.22)$$

sowie der mittlere absolute Fehler (engl. *mean absolute error*)

$$\text{MAE} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |h_i - C_i| \quad (4.23)$$

ermittelt (Devore (2015), Chai u. Draxler (2014)). Außerdem wird der Median sowie das neunte Dezil aller Differenzen zwischen Ceilometer-Messung und CSS-Kamera-Messung bestimmt. Das neunte Dezil beschreibt die Messdifferenz, welche von 90 % der Messungen unterschritten wird. Bevor eine zusammenfassende Auswertung für alle betrachteten Tage mittels statistischer Kennzahlen vorgenommen wird, werden im Folgenden zunächst die vorherrschenden Fehlereinflüsse anhand von Beispieltagen diskutiert. Dabei wird insbesondere analysiert, unter welchen meteorologischen Bedingungen gute Ergebnisse erzielt werden und für welche Randbedingungen Systemverbesserungen notwendig sind.

Im Allgemeinen begünstigen zeitlich konstante äußere Bedingungen (Wolkengeschwindigkeit, die Art der Wolken, Wolkenhöhe) eine präzise Messung durch das CSS-Kamera-System. Ein Beispieltag mit konstanten meteorologischen Bedingungen stellt der 21.08.2016 dar. Das zugehörige Ergebnis ist in Abbildung 4.5 dargestellt. Der MAE beträgt für diesen Tag 209 m, das neunte Dezil 352 m und der Median der Messdifferenzen 121 m. An diesem Tag werden fast ausschließlich kleine Kumuluswolken beobachtet. Verallgemeinernd wird festgestellt, dass für Kumuluswolken häufig gute Ergebnisse erzielt werden. Ein weiterer Tag, an dem überwiegend

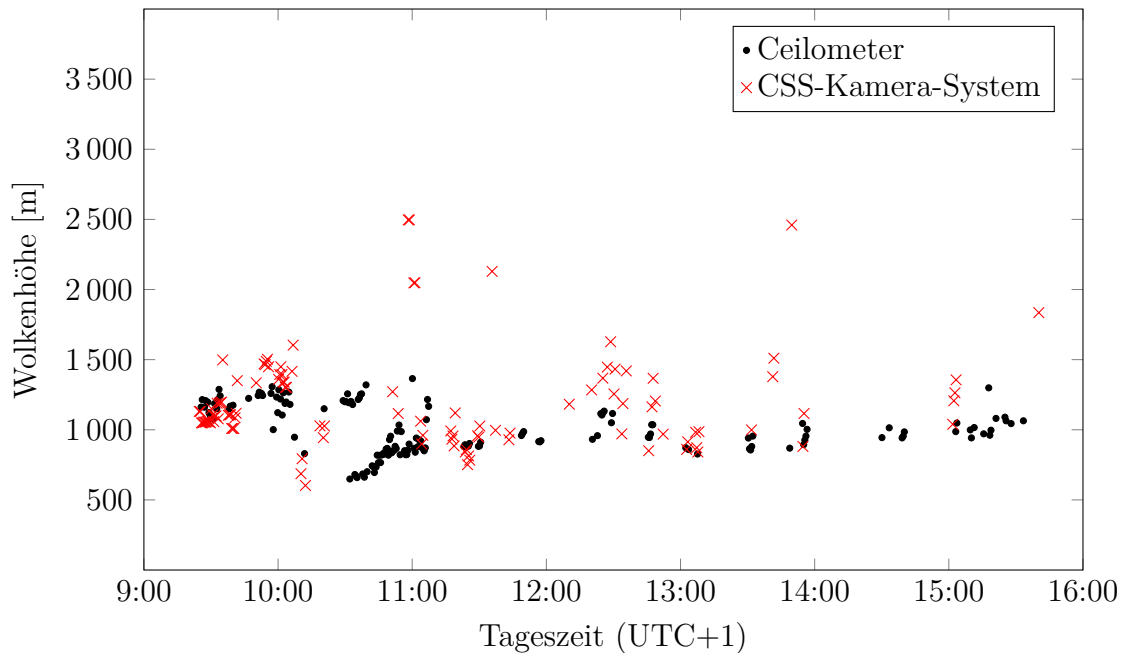


Abbildung 4.5: Ergebnisse der Wolkenhöhenberechnung für den 21.08.2016: An diesem Tag werden vor allem kleine Kumuluswolken beobachtet, deren Höhe präzise vermessen wird. Der MAE beträgt für diesen Tag 209 m.

Kumuluswolken geringer Höhe beobachtet werden, ist der 01.12.2016. Das Ergebnis der Höhenbestimmung ist in Abbildung 4.6 dargestellt. Vor 11:15 Uhr und nach 15:30 Uhr existieren Wolken größerer Höhe. Nach 15:30 Uhr werden vor allem Altocumulus-Wolken beobachtet, deren Wolkenhöhe leicht überschätzt wird. Die Höhenmessungen vor 11:15 Uhr weisen große Abweichungen zu den Ceilometer-Messungen auf. Grund hierfür ist die Existenz mehrerer Wolkenschichten übereinander: Auf einer Höhe von 500 m existieren Kumuluswolken, zwischen 1000 m und 2000 m existiert eine zweite Wolkenschicht. In diesem Fall bewegen sich beide Wolkenschichten mit einer stark unterschiedlichen Geschwindigkeit und in entgegengesetzten Richtungen. Die Schichtung mehrerer Wolkenschichten spiegelt sich auch in den Ceilometer-Messungen wider. Die Geschwindigkeitsmessungen des CSS resultieren aus Verschattungen durch die schnell ziehenden tiefen Kumuluswolken. Die Berechnung der Wolkenbewegungen im Kamerabild basieren hingegen vor al-

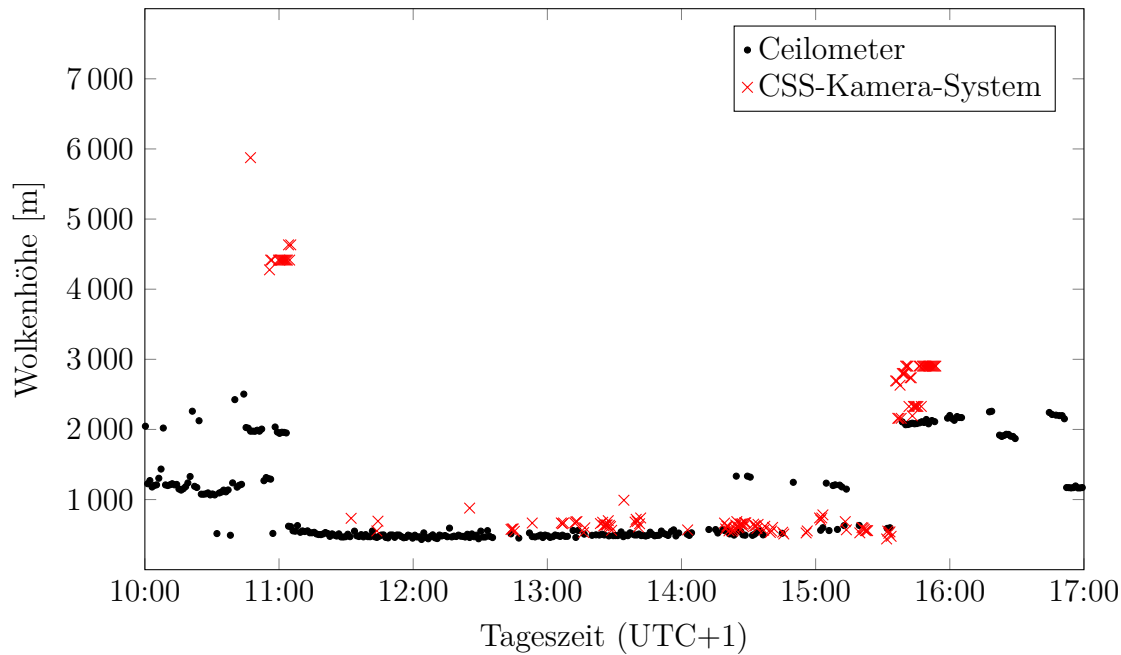


Abbildung 4.6: Ergebnisse der Wolkenhöhenberechnung für den 01.12.2016: Die tiefen Kumuluswolken zwischen 11:15 und 15:30 Uhr werden präzise vermessen. Für die Altocumulus-Wolken vor 11:15 Uhr werden große Messdifferenzen beobachtet.

lem auf der höher gelegenen Wolkenschicht. Dies führt zu einer systematischen Überschätzung der Wolkenhöhe vor 11:15 Uhr. Der RMSE beträgt für diesen Tag 1119 m. Für die tiefen Kumuluswolken zwischen 11:15 und 15:30 Uhr ergibt sich ein RMSE von 194 m. Überwiegend Kumuluswolken werden auch am 15.07.2016 beobachtet (Abbildung 4.7). Es fällt auf, dass zwischen 10:00 und 10:30 Uhr vom CSS-Kamera-System Wolkenhöhen berechnet werden, vom Ceilometer jedoch keine Wolken detektiert werden. Der Grund hierfür ist, dass in diesem Zeitraum Kumuluswolken lediglich am Rand des Ausschnitts des Wolkenkamerabilds beobachtet werden. Ihre Verschiebung im Kamerabild kann daher bestimmt werden, die Wolken ziehen jedoch nicht durch den Detektionskegel des Ceilometers und werden daher von diesem nicht erfasst. Der MAE beträgt für diesen Tag 88 m, das neunte Dezil 149 m und der Median 64 m.

Darüber hinaus existieren eine Reihe von Tagen, an denen konstante äußere Bedingungen vorherrschen und Wolkenhöhen von deutlich über 1000 m detektiert werden. Als Beispiel ist in Abbildung 4.8 das Ergebnis für den 14.05.2016 dargestellt. An diesem Tag werden vor allem Altocumulus-Wolken mit einer Höhe von 2000 bis 3000 m beobachtet. Der MAE beträgt 427 m, das neunte Dezil 953 m und der Median 256 m. Größere Messdifferenzen finden sich vor allem zwischen 14:00 und 15:00 Uhr sowie bei einigen Messungen kurz nach 18:00 Uhr. Die Abweichungen zwischen 14:00 und 15:00 Uhr resultieren daraus, dass auf Basis der CSS Messungen

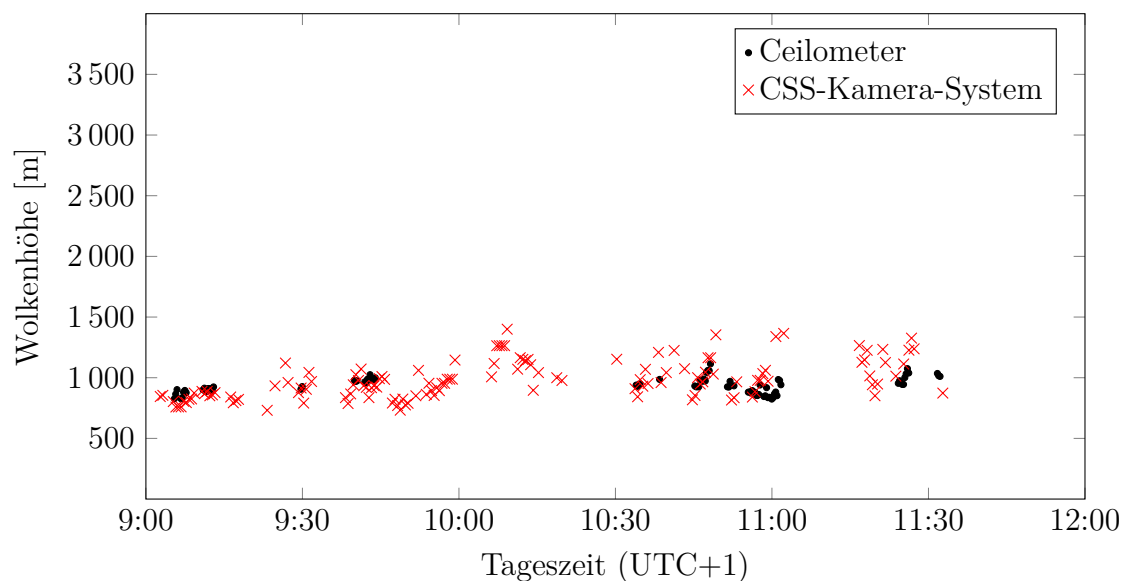


Abbildung 4.7: Ergebnisse der Wolkenhöhenberechnung für den 15.07.2016: An diesem Tag werden Kumuluswolken mit einer Höhe von etwa 1000 m beobachtet. Der MAE beträgt für diesen Tag 88 m. Zwischen 10:00 und 10:30 Uhr werden Wolken vermessen, welche am Rand des Bildausschnitts erfasst werden. Zu diesen Wolken liegen keine Ceilometer-Messungen vor, da sie nicht durch den Detektionskegel des Ceilometers ziehen.

eine zu hohe Wolkengeschwindigkeit angenommen wird. Zum anderen können die Phänomene der Wolkenbildung und -auflösung vermehrt beobachtet werden. Die Höhenmessungen um 15:00 Uhr beziehen sich beispielsweise auf eine Wolke, die lediglich 9 Minuten sichtbar ist. Um 14:55 Uhr beginnt sich die Wolke zu bilden, erreicht um 14:59 Uhr ihre größte sichtbare Ausdehnung und löst sich in der Folge bis um 15:04 Uhr wieder vollständig auf. Phänomene wie Wolkenbildung und -auflösung erschweren die korrekte Erfassung der Wolkenverschiebung im Kamerabild und erhöhen die Messungenauigkeit des Gesamtsystems. Die fehlerhaften Messungen nach 18:00 Uhr beruhen auf einer zu gering angenommenen Wolkengeschwindigkeit. Zu diesem Zeitpunkt basiert die gemittelte Geschwindigkeitsinformation auf lediglich 3 CSS-Messungen.

Ein Tag mit Altocumulus-Wolken auf einer Höhe von 4000 bis 5000 m ist der 25.06.2016, welcher in Abbildung 4.9 dargestellt ist. Die Messungen zeigen eine gute Übereinstimmung mit den Ceilometer-Messungen. Im Zeitraum von 12:00 bis 15:00 Uhr behindern eine mangelhafte Wolkensegmentierung die Höhenbestimmung. Der MAE beträgt 487 m, das neunte Dezil 1057 m und der Median 377 m.

Das Ergebnis der Wolkenhöhenbestimmung hängt stark von der Art der Wolken ab. Eine Einführung in die Klassifizierung von Wolken findet sich im Anhang A.4. Bei den bisher vorgestellten Tagen werden fast ausschließlich Wolken mit einer klar umrissenen Berandung beobachtet. Eine scharfe Berandung und eine gleichzei-

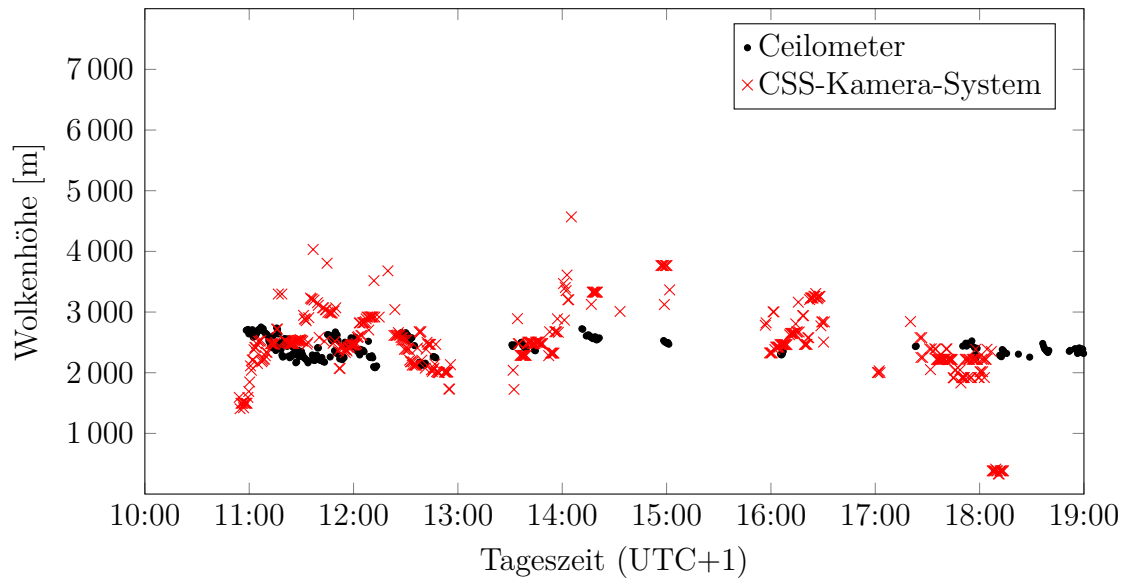


Abbildung 4.8: Ergebnisse der Wolkenhöhenberechnung für den 14.05.2016: An diesem Tag werden Altocumulus-Wolken auf einer Höhe von 1000 bis 2000 m beobachtet. Der MAE beträgt für diesen Tag 427 m.

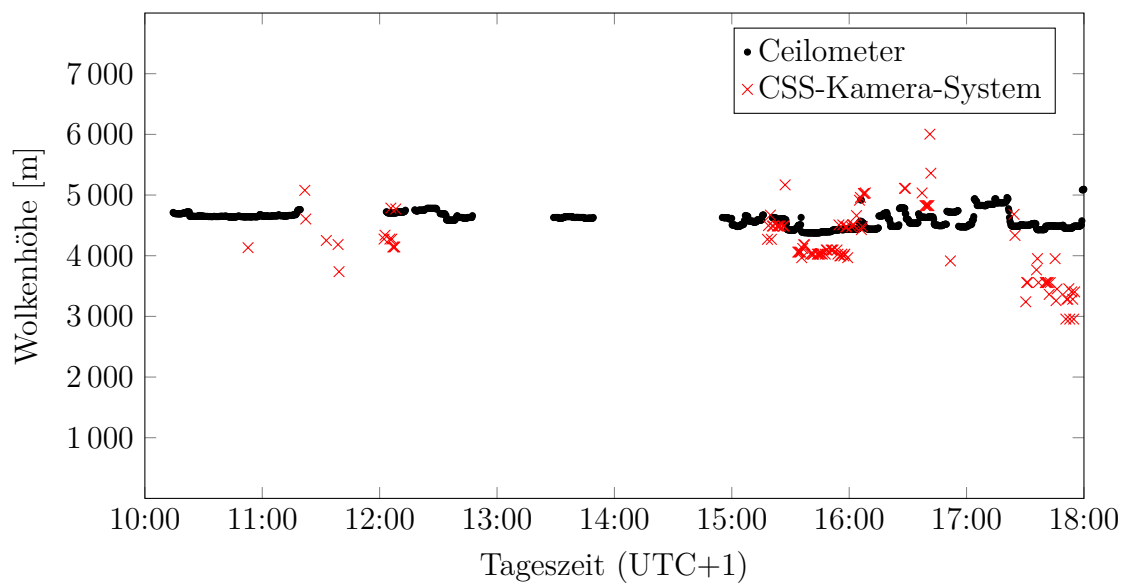


Abbildung 4.9: Ergebnisse der Wolkenhöhenberechnung für den 25.06.2016: Es werden überwiegend Altocumulus-Wolken mit einer Höhe von 4000 bis 5000 m beobachtet. Im Zeitraum von 12:00 bis 15:00 Uhr behindern eine mangelhafte Wolkensegmentierung die Höhenbestimmung.

tig geringe Transmissivität weisen vor allem Kumuluswolken auf. Diese erzeugen im Signalverlauf von Einstrahlungssensoren steile Leistungsabfälle. Derartige Signalverläufe ermöglichen eine präzise Bestimmung der Wolkengeschwindigkeiten

durch den CSS. Außerdem begünstigen Wolken mit scharfer Berandung die Segmentierung der Kamerabilder sowie die Erfassung von Wolkenbewegungen (Peng u. a. (2015)). Die höchsten Wolken, welche eine klar umrissener Berandung aufweisen, werden am 25.08.2016 über einen Zeitraum von etwa einer Stunde (12:30 bis 13:45 Uhr) beobachtet (Abbildung 4.10). Hierbei handelt es sich um Altocumulus- sowie Cirrocumulus-Wolken. Ihre Höhe wird vom Ceilometer zu etwa 6000 bis 7000 m bestimmt. Im weiteren Tagesverlauf (zwischen 15:00 und 16:00 Uhr) werden Wolken gleicher Höhe beobachtet. In diesem Fall wird die Höhe deutlich zu gering berechnet, da vom CSS eine zu niedrige Wolkengeschwindigkeit gemessen wird.

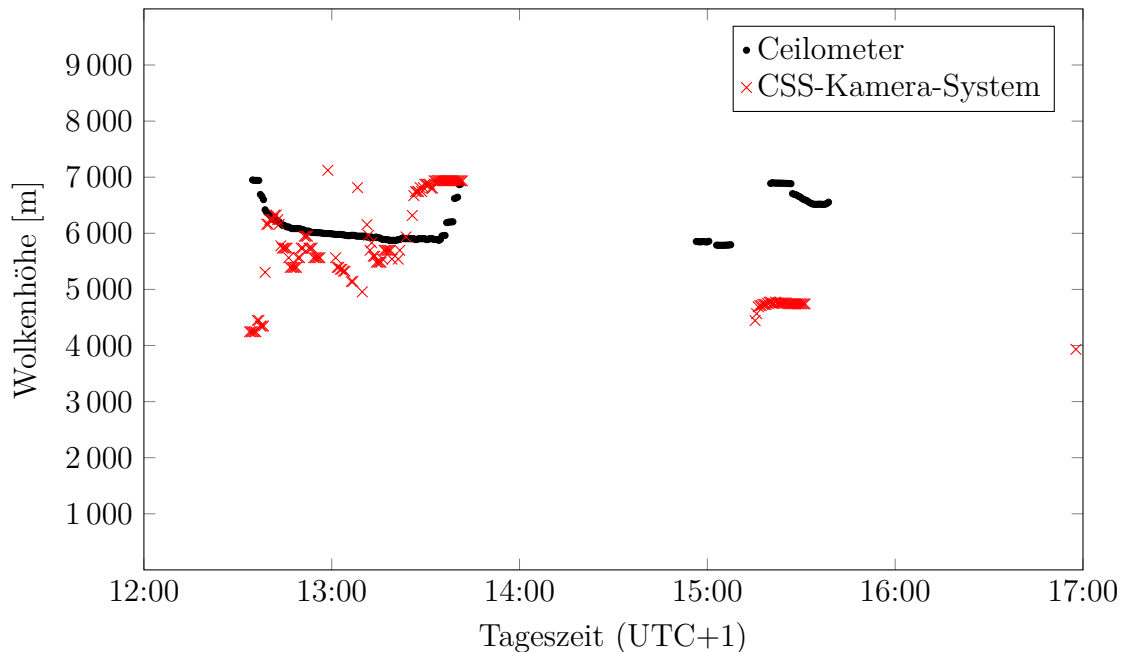


Abbildung 4.10: Ergebnisse der Wolkenhöhenberechnung für den 25.08.2016: An diesem Tag werden Altocumulus- und Cirrocumulus-Wolken mit einer Höhe von über 6000 m beobachtet. Die Abweichungen der Messungen zwischen 15:00 und 16:00 Uhr resultieren aus zu niedrigen Wolkengeschwindigkeiten.

Neben der Gattung der Kumuluswolken können Wolken der Spezies *floccus* in Kombination mit der Wolkengattung Altocumulus besonders gut mit dem CSS-Kamera-System vermessen werden. Am 03.06.2016 werden Altocumulus-floccus-Wolken über einen Zeitraum von mehreren Stunden beobachtet. Das Ergebnis der Höhenmessung ist in Abbildung 4.11 dargestellt. Die Höhe der Wolken beträgt an diesem Tag etwa 4000 m. Für weite Bereiche des Tages stimmen die Messungen gut mit den Ceilometer-Messungen überein. Lediglich vor 11:00 Uhr sowie zwischen 12:00 und 13:00 Uhr existieren größere Abweichungen. Diese sind auf eine zu gering angenommene Wolkengeschwindigkeit zurückzuführen. Zwischen 10:00 und 11:00 Uhr steigt der 30-Minuten-Median der CSS-Geschwindigkeiten von etwa 17 m/s auf 20 m/s an, wodurch sich die Messdifferenzen verringern. Weitere Analysen zu den vom CSS

ermittelten Geschwindigkeiten an diesem Tag finden sich auch in Kapitel 3.2. Der MAE beträgt für diesen Tag 442 m, das neunte Dezil 1023 m und der Median 372 m.

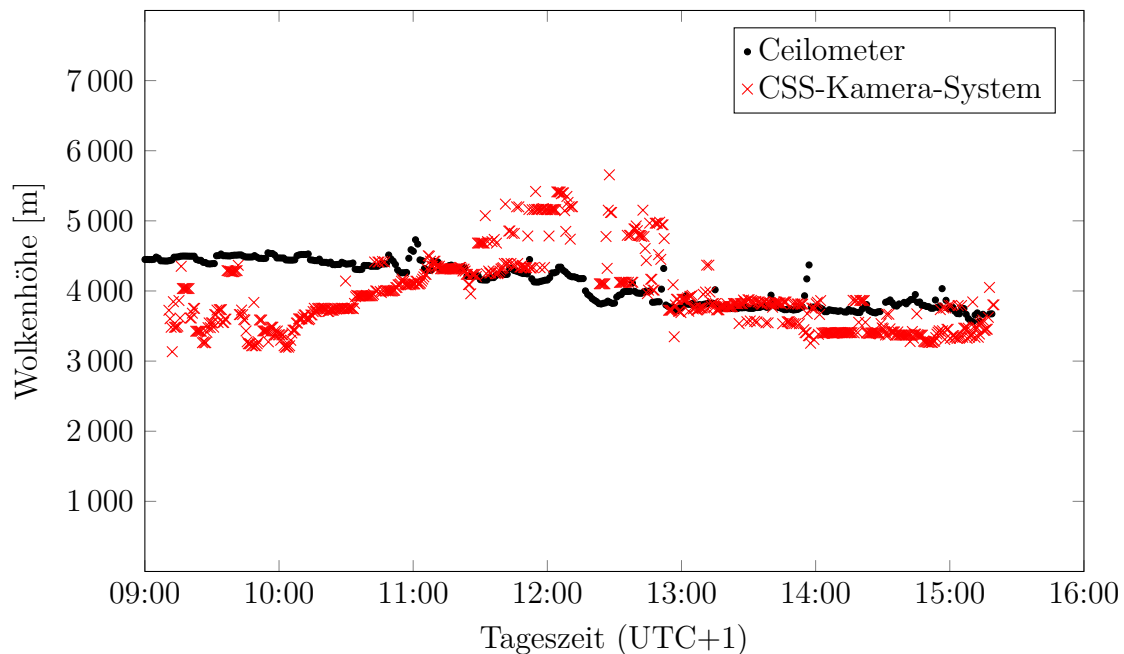


Abbildung 4.11: Ergebnisse der Wolkenhöhenberechnung für den 03.06.2016: An diesem Tag werden Altocumulus-Wolken mit einer Höhe von etwa 4000 m beobachtet. Der MAE beträgt für diesen Tag 442 m.

Wolken mit einer Höhe von über 5000 m weisen in den meisten Fällen keine klar umrissene Berandung auf. Eine Wolkengattung, deren Höhe an keinem Tag richtig bestimmt wird, sind Cirrus-Wolken. Als Beispiel ist in Abbildung 4.12 das Ergebnis der Höhenbestimmung für den 27.03.2016 dargestellt. An diesem Tag werden durchgehend Cirrus-Wolken auf einer Höhe von 8000 bis 11000 m beobachtet. Für diesen Tag liegen 75 Höhenmessungen des CSS-Kamera-System vor, welche jedoch ausnahmslos Wolkenhöhen von unter 3000 m bestimmen. Die fehlerhaften Messungen können auf eine vom CSS zu gering bestimmte Wolkengeschwindigkeit zurückgeführt werden. Die Segmentierung der Kamerabilder und die Bewegungserfassung liefert für diesen Tag gute Resultate.

Am 10.06.2016 werden die Schwächen des CSS-Kamera-Systems bei Wolken ohne klar umrissene Berandung besonders eindrucksvoll offengelegt. Das Ergebnis der Höhenbestimmung ist in Abbildung 4.13 dargestellt. An diesem Tag wird der CSS bis etwa 13:00 Uhr überwiegend durch Cirrus-Wolken verschattet. Sämtliche beobachteten Wolkenfelder zwischen 10:00 und 13:00 Uhr befinden sich auf einer Höhe von 6000 bis 8000 m. Die großen Abweichungen vor 13:00 Uhr erklären sich mit einer deutlich zu gering angenommenen Wolkengeschwindigkeit durch den CSS.

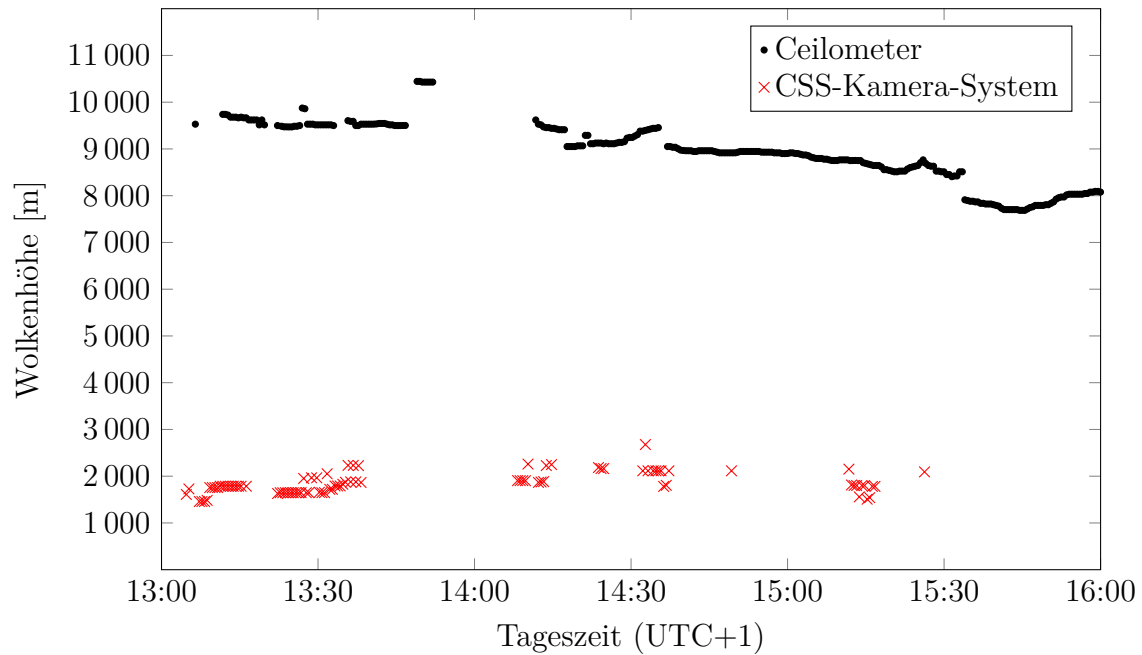


Abbildung 4.12: Ergebnisse der Wolkenhöhenberechnung für den 27.03.2016: Für die an diesem Tag beobachteten Cirrus-Wolken auf über 8000 m wird eine deutlich zu geringe Wolkenhöhe gemessen. Die fehlerhaften Messungen können auf eine vom CSS zu gering bestimmte Wolkengeschwindigkeit zurückgeführt werden.

Ab etwa 13:00 Uhr werden vermehrt Altocumulus-Wolken beobachtet, welche der Spezie floccus zugeordnet werden können. Dies führt zu einem Anstieg der vom CSS bestimmten Wolkengeschwindigkeiten von etwa 5 m/s auf 18 m/s. In der Folge wird die Höhe der Wolken ab etwa 13:30 Uhr richtig ermittelt. Der zeitlich verzögerte Anstieg der Messungen des CSS-Kamera-System erklärt sich durch die 30-minütige Mittelwertbildung der Wolkengeschwindigkeiten. Die Höhe der Wolken werden bis etwa 15:00 Uhr sehr genau ermittelt. Anschließend existieren keine Messungen mehr, da nicht genügend CSS-Geschwindigkeitsmessungen zur Verfügung stehen. Die Höhenwolken ab 16:30 Uhr sind erneut Cirrus-Wolken. Ihre Höhe wird folglich wieder deutlich unterschätzt.

Neben der Wolkenart, der zeitlichen Konstanz meteorologischer Bedingungen und der Wolkenhöhe existieren weitere Einflüsse, die die Wolkenhöhenmessung mit Hilfe des CSS-Kamera-Systems beeinflussen. Besonders schwierig gestaltet sich die Höhenbestimmung beim gleichzeitigen Auftreten mehrerer Wolkenschichten. Dies ist beispielsweise am 13.05.2016 zwischen 13:00 und 15:00 Uhr der Fall. Das Ergebnis der Höhenbestimmung ist in Abbildung 4.14 dargestellt. Bis 10:30 Uhr werden Kumuluswolken beobachtet. Ihre Höhe wird innerhalb einer Abweichung von 500 m richtig ermittelt. Bei den ab 10:30 Uhr beobachteten Cirrostratus-Wolken zeigen sich große Abweichungen. Ab 13:00 Uhr bilden sich zu den Cirrostratus-Wolken vermehrt

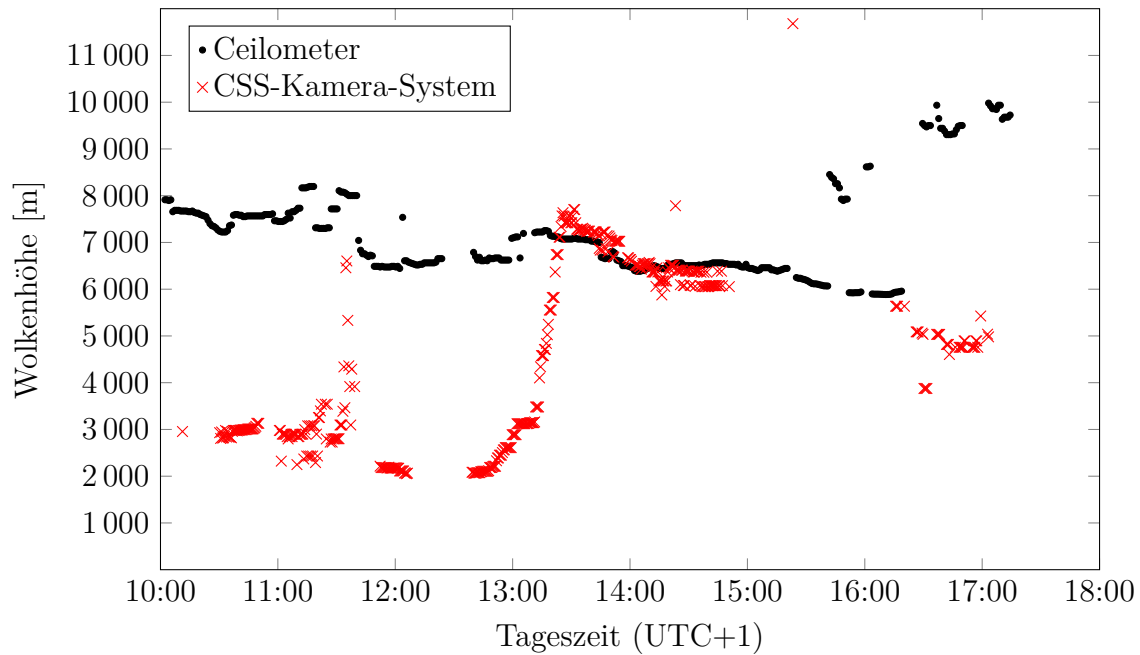


Abbildung 4.13: Ergebnisse der Wolkenhöhenberechnung für den 10.06.2016: An diesem Tag wird der CSS bis etwa 13:00 Uhr durch Cirrus-Wolken verschattet. Die Abweichungen der Höhenmessungen resultieren aus zu gering angenommenen Wolkengeschwindigkeiten durch den CSS. Zu den ab 13:00 Uhr beobachteten Altocumulus-Wolken werden deutlich höhere Wolkengeschwindigkeiten durch den CSS bestimmt, was die Messdifferenzen deutlich vermindert. Bei den ab 16:30 Uhr auftretenden Wolken handelt es sich wieder um Cirrus-Wolken.

Altocumulus-Wolken. Die Existenz der beiden Wolkenschichten kann von dem System nicht hinreichend aufgelöst werden. Es werden Höhen gemessen, die zwischen den beiden Wolkenschichten liegen. Ab 17:00 Uhr werden vor allem Cirrus-Wolken beobachtet, deren Höhe erneut deutlich unterschätzt wird. An diesem Tag treffen somit drei ungünstige Einflüsse zusammen: die Existenz mehrerer Wolkenschichten, zeitlich unbeständige Bedingungen sowie Cirrus-Wolken großer Höhe.

Ein weiterer Tag, an denen zwei Wolkenschichten beobachtet werden ist der 29.09.2016, dessen Ergebnisse in Abbildung 4.15 dargestellt sind. An diesem Tag werden vor allem Kumulus- sowie Altocumulus-Wolken auf einer Höhe von unter 1000 m beziehungsweise über 2000 m beobachtet. Die Wolkenfelder bewegen sich in unterschiedliche Richtungen. Da die Wolken beider Schichten jedoch in diesem Fall etwa die gleiche Geschwindigkeit aufweisen, können die Höhen beider Schichten richtig erfasst werden. Dies kann besonders im Zeitraum zwischen 13:00 und 16:00 Uhr beobachtet werden.

Es werden immer wieder Zeitintervalle beobachtet, an denen das Ceilometer eine Wolkenhöhe ermittelt, das CSS-Kamera-System jedoch nicht. Dies ist vor allem bei

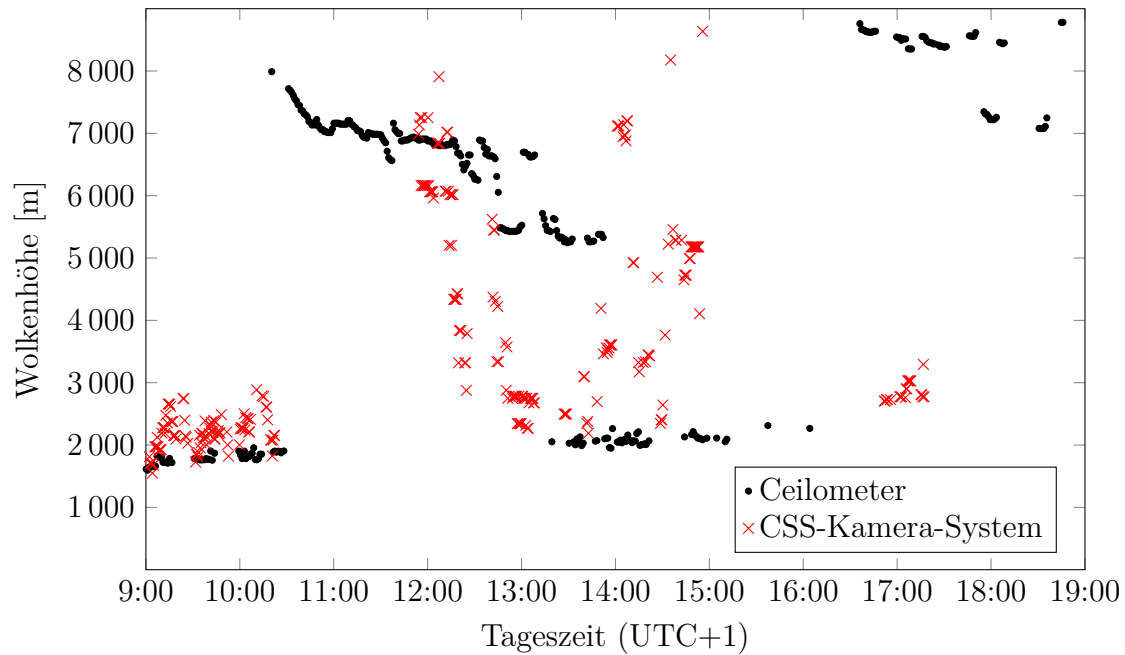


Abbildung 4.14: Ergebnisse der Wolkenhöhenberechnung für den 13.05.2016: Zwischen 13:00 und 15:00 Uhr existieren mehrere Wolkenschichten übereinander. Die Wolkenhöhen werden vom CSS-Kamera-System nicht korrekt ermittelt. Ab 17:00 Uhr werden Cirrus-Wolken auf einer Höhe von über 7000 m beobachtet.

geschlossener Wolkendecke der Fall. Der Grund hierfür geht auf den methodischen Ansatz zurück: Zum einen ermittelt der CSS während durchgehender Bewölkung keine Wolkengeschwindigkeiten und zum anderen können aufgrund der fehlenden Struktur in den segmentierten Wolkenkamerabildern keine Wolkenverschiebungen erfasst werden. Dieses Phänomen tritt am 28.09.2016 besonders deutlich zu Tage. Das Ergebnis der Höhenberechnung ist zusammen mit dem Bewölkungsgrad in Abbildung 4.16 dargestellt. Der Bewölkungsgrad stellt dabei den Anteil der Wolkenpixel im Bildausschnitt, der zur Wolkenbewegungserfassung verwendet wird, dar. Höhenmessungen existieren nur zu Zeitpunkten, an denen der Himmel nicht vollständig bedeckt ist. Lediglich um 15:30 Uhr könnten demnach zusätzliche Höhenmessungen erwarten werden. Zu diesem Zeitpunkt stehen jedoch aufgrund der vorangegangenen bedeckten Himmelssituation keine CSS-Geschwindigkeitsmessungen zur Verfügung. Um 12:00 und 15:00 Uhr wird zudem Niederschlag beobachtet.

Für die Höhenmessung problematisch sind darüber hinaus Zeitintervalle, in denen keine eindeutige Wolkenzugrichtung vorhanden ist. Es kommt gelegentlich vor, dass sich Wolken direkt über dem Kamera-Standort bilden oder auflösen. Häufig ziehen diese Wolken nicht in eine Richtung ab, sondern verharren an einer Stelle. Für das CSS-Kamera-System sind derartige Phänomene problematisch, da zum einen der CSS keine sinnvollen Wolkengeschwindigkeiten ermitteln kann. Die ermittelten Messungen

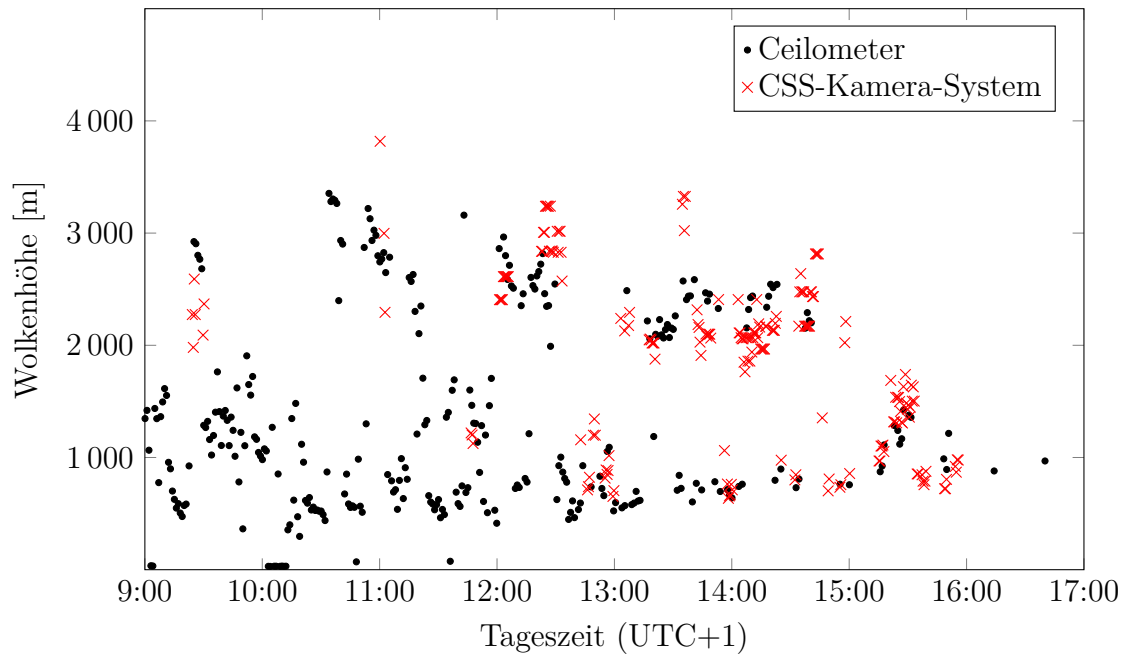


Abbildung 4.15: Ergebnisse der Wolkenhöhenberechnung für den 29.09.2016: An diesem Tag existieren mehrere Wolkenschichten übereinander. Die Höhen beider Schichten können korrekt erfasst werden, da sie sich mit der gleichen Geschwindigkeit fortbewegen.

beruhen vielmehr auf zufälligen Bewegungen der Wolken. Zum anderen kann auf Basis der Kamerabilder keine einheitliche Verschiebung erfasst werden. Ein Beispiel für einen solchen Tag ist der 31.08.2016. Das Ergebnis der Höhenberechnung sowie die vom CSS ermittelten Wolkenzugrichtungen sind in Abbildung 4.17 dargestellt. Die Richtungsmessungen vom CSS streuen stark über alle Himmelsrichtungen, da sie Ergebnis zufälliger, uneinheitlicher Wolkenbewegungen sind.

In Kapitel 3.2 wird ein verbesserter Algorithmus zur Berechnung von Bewegungsvektoren für den CSS vorgestellt. Dieser beruht auf der *least trimmed squares*-Methode (LTS-Methode). Im Folgenden wird erläutert, inwiefern die Verwendung dieses neuen Algorithmus Einfluss auf die Wolkenhöhenbestimmung hat. Der bisher im CSS verwendete Berechnungsalgorithmus wird im Folgenden als LSQ-Methode bezeichnet. Als Beispieltag wird der 01.09.2016 betrachtet. Die Ergebnisse der Höhenberechnung sind in Abbildung 4.18 für die LTS-Methode (rot) und die LSQ-Methode (grün) dargestellt. Die Höhenmessungen, die mit der LSQ-Methode erzielt werden, unterscheiden sich von den Messungen mit der LTS-Methode nur geringfügig: Werden nur die Messungen betrachtet, zu denen beide Methoden eine Wolkenhöhe ermittelt haben, beträgt der MAE der LSQ-Methode 110 m und der MAE der LTS-Methode 102 m. Ebenso zeigen sich kleine Unterschiede beim neunten Dezil ($9. \text{Dezil}_{\text{LSQ}} = 208 \text{ m} > 9. \text{Dezil}_{\text{LTS}} = 193 \text{ m}$) und beim Median der Messdifferenzen ($\text{Median}_{\text{LSQ}} = 103 \text{ m} > \text{Median}_{\text{LTS}} = 84 \text{ m}$). Abgesehen von den leichten quantitativen Verbesse-

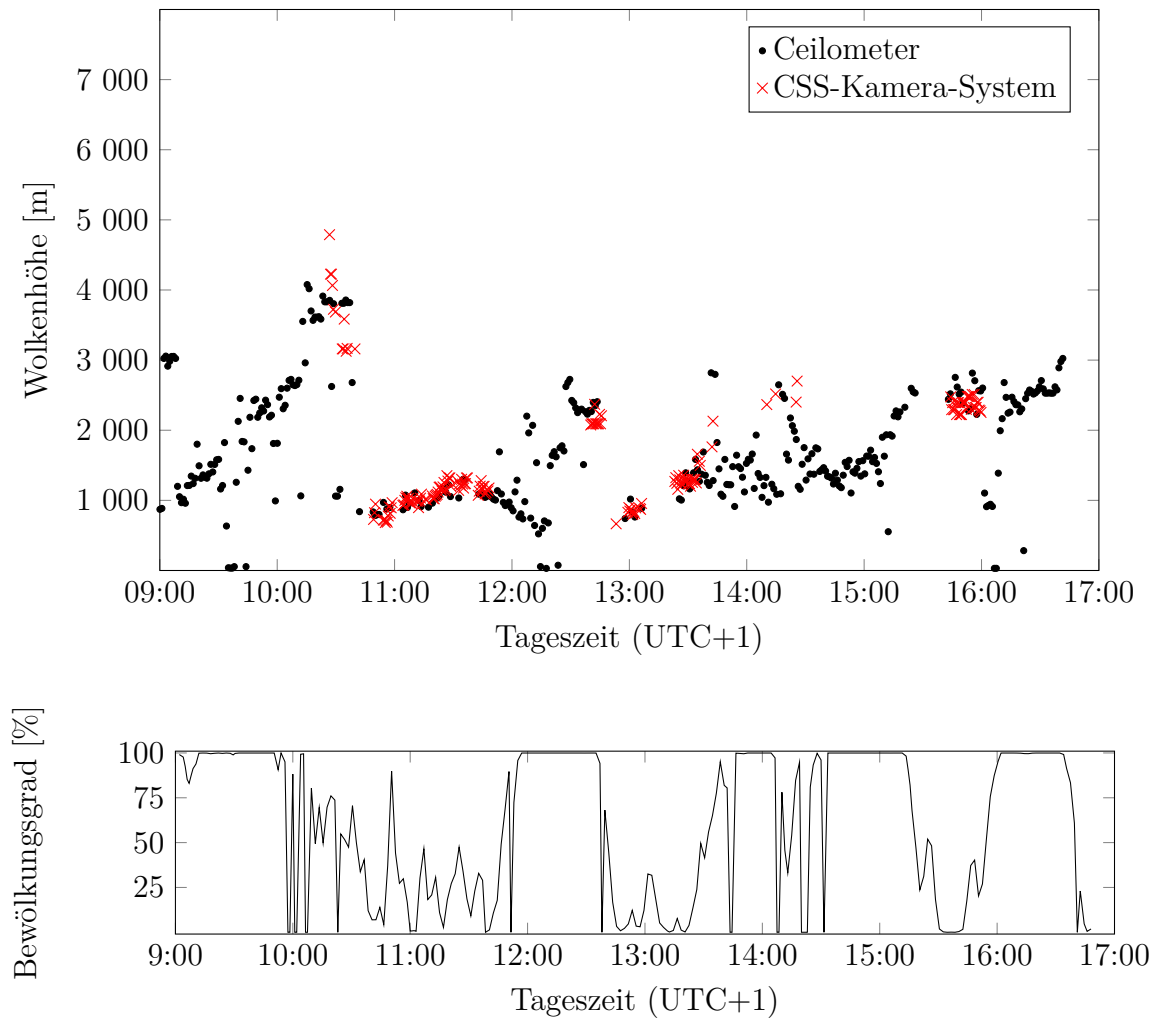


Abbildung 4.16: In der oberen Darstellung sind die Ergebnisse der Wolkenhöhenbestimmung für den 28.09.2016 abgebildet. Die untere Darstellung zeigt den Bewölkungsgrad innerhalb des Bildausschnitts, der zur Wolkenbewegungserfassung verwendet wird. Zu Zeitpunkten, an denen der Bewölkungsgrad 100 % entspricht, kann aufgrund fehlender Strukturen im Bildausschnitt keine Wolkenhöhe berechnet werden.

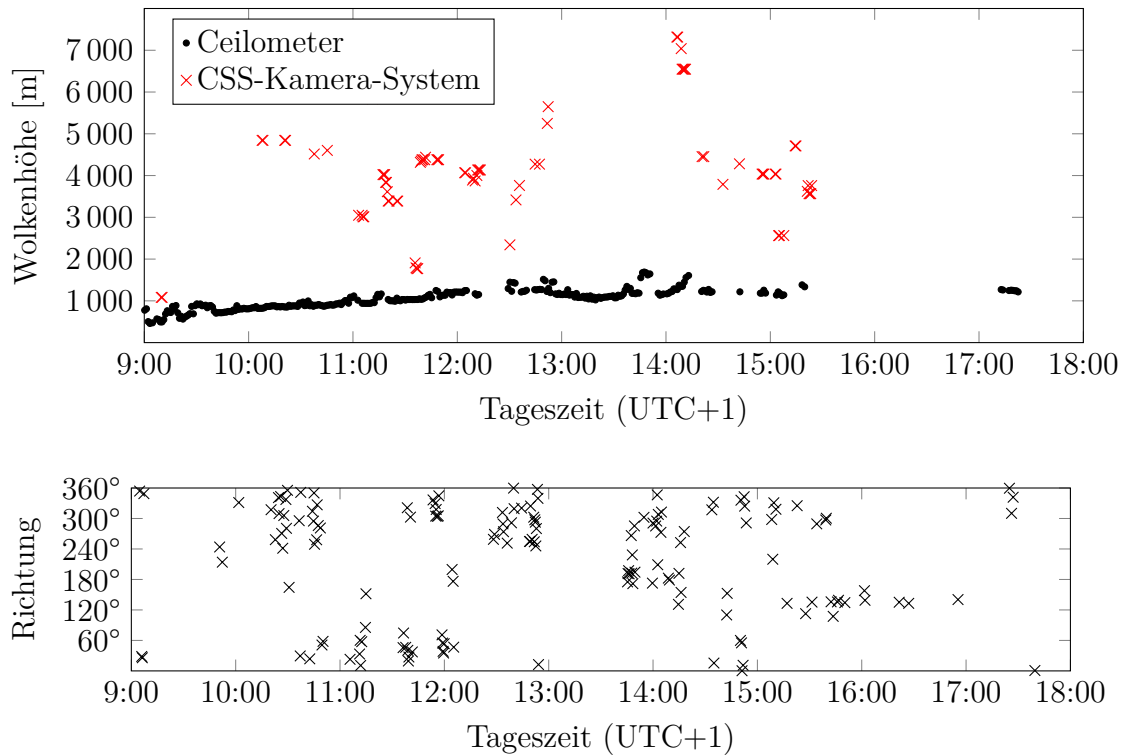


Abbildung 4.17: In der oberen Darstellung sind die Ergebnisse der Wolkenhöhenbestimmung für den 31.08.2016 abgebildet. Die Höhenmessungen weichen stark von den Messungen des Ceilometers ab, da die Wolken über dem Kamerastandort verharren und nicht in eine Richtung abziehen. Die untere Darstellung zeigt die vom CSS bestimmten Wolkenzugrichtungen. Die Richtungsmessungen streuen stark über alle Himmelsrichtungen, da sie Ergebnis zufälliger, uneinheitlicher Wolkenbewegungen sind.

rungen, besteht der zentrale Vorteil der LTS-Methode darin, dass sie deutlich mehr Geschwindigkeitsmessungen ermöglicht als die LSQ-Methode. Auf diese Weise ist es möglich, zu Zeitpunkten Wolkenhöhen zu bestimmen, zu denen die LSQ-Methode keine oder zu wenige Geschwindigkeitsmessungen bereitgestellt hätte und daher eine Wolkenhöhenbestimmung nicht durchgeführt werden könnte. Dies tritt am betrachteten Beispieltag zwischen 12:00 und 13:00 Uhr auf: Hier können mit der LTS-Methode die Höhe dreier Wolken ermittelt werden, welche durch die LSQ-Methode aufgrund fehlender Geschwindigkeitsmessungen nicht ermittelt werden können. Insgesamt werden für alle betrachteten Tage mit der LSQ-Methode 6407 Höhenmessungen und mit der LTS-Methode 8320 Messungen (+29,9 %) durchgeführt.

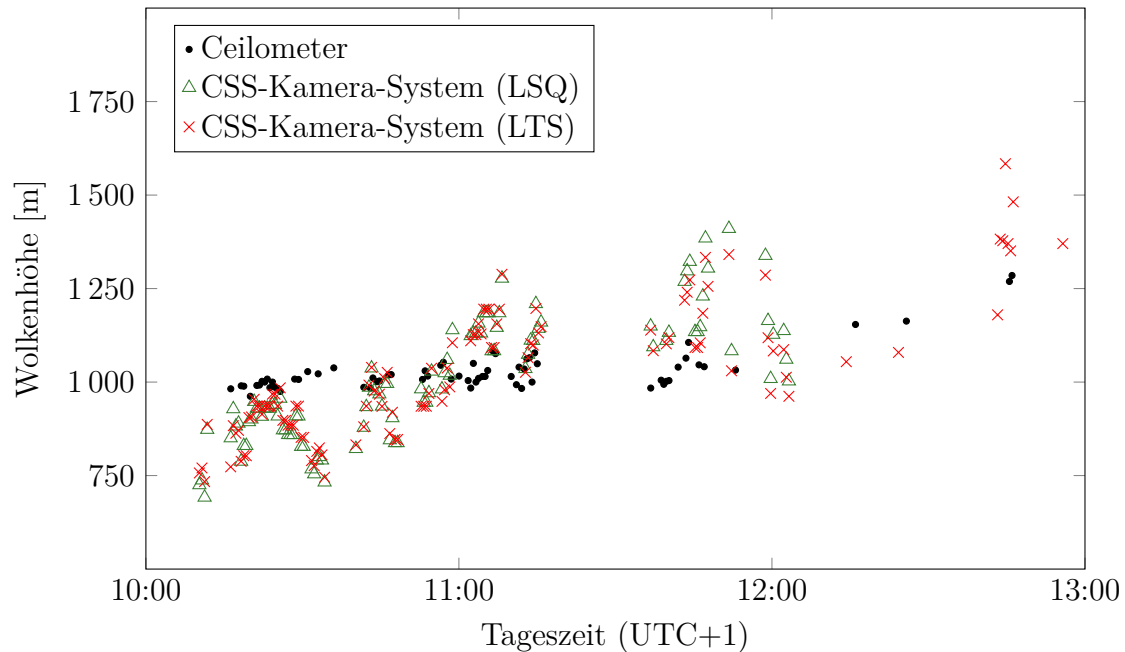


Abbildung 4.18: Ergebnisse der Wolkenhöhenberechnung für den 01.09.2016. In schwarz sind vom Ceilometer bestimmten Wolkenhöhen dargestellt. In rot und grün sind die Höhenmessungen des CSS-Kamera-Systems aufgetragen, welche auf Geschwindigkeiten der LTS-Methode beziehungsweise der LSQ-Methode basieren.

Gesamtauswertung

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Wolkenhöhenbestimmung durch das CSS-Kamera-System für alle betrachteten 70 Tage (8320 Einzelmessungen) zusammenfassend dargestellt. An den untersuchten Tagen wird ein breites Spektrum von unterschiedlichen meteorologischen Bedingungen und Bewölkungssituationen beobachtet. Die Häufigkeitsverteilung der Ceilometer-Höhenmessungen ist in Abbildung 4.19 dargestellt. Ein Großteil der beobachteten Wolken weisen eine Höhe von 1000 bis 3000 m sowie 4000 bis 5000 m auf.

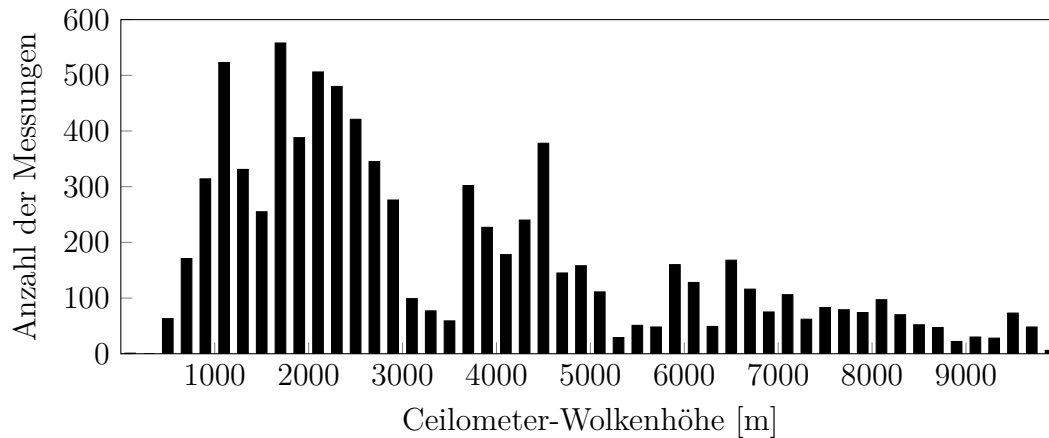


Abbildung 4.19: Dargestellt ist die Häufigkeitsverteilung der Ceilometer-Messungen, zu denen innerhalb eines Zeitintervalls von ± 30 Sekunden eine Wolkenhöhe mit dem CSS-Kamera-System bestimmt wurde.

In Abbildung 4.20 sind die Höhenmessungen des Ceilometers über denen des CSS-Kamera-Systems aufgetragen. Die Messpaare werden in Klassen mit einer Breite von je 200 m eingeteilt. Die Farbskalierung bezieht sich auf die absolute Anzahl an Messpaaren pro Klasse. Die ermittelten Wolkenhöhen beider Systeme stimmen für Ceilometer-Messungen von unter 5000 m gut überein: Für diese Messungen ergibt sich ein RMSE von 1280 m, ein MAE von 695 m sowie ein BIAS von 261 m. Für Ceilometer-Messungen über 5000 m wird die Wolkenhöhe durch das CSS-Kamera-System systematisch unterschätzt. Werden alle 8320 Messungen ausgewertet, ergibt sich ein RMSE von 2186 m, ein MAE von 1239 m und ein BIAS von 410 m.

In Abbildung 4.21 sind das arithmetische Mittel (MAE) sowie der Median aller absoluten Messdifferenzen zwischen Ceilometer und CSS-Kamera-System über der Wolkenhöhe aufgetragen. Bei der Auswertung werden die Messdifferenzen zu Höhenintervallen von je 500 m subsumiert ($[0,500)$, $[500,1000)$,...). Bei der Einteilung der Messdifferenzen in die einzelnen Höhenklassen ist die Ceilometer-Messung ausschlaggebend. In grau ist außerdem das Intervall zwischen dem unteren und oberen Quantil dargestellt. Die Fehlergrößen steigen bis zu einer Wolkenhöhe von etwa 2000 m an und sind für Wolkenhöhen zwischen 2000 und 5000 m etwa konstant. Für Wolkenhöhen über 5000 m steigen die Fehler stark an.

Wie bereits diskutiert, hängen die Messfehler des CSS-Kamera-Systems stark von der Wolkengattung ab. Für Wolken mit scharfer Berandung zeigt das System gute Resultate. Im Folgenden wird dieser Zusammenhang quantitativ belegt. Dazu werden die in Abschnitt 3.1.2 eingeführten 12 Verschattungsklassen herangezogen, welche die Dauer und Schattenstärke von Verschattungen kategorisieren. Bei der Zuordnung der einzelnen Messungen zu den Verschattungsklassen wird wie folgt vorgegangen: Es werden zunächst zu allen betrachteten Tagen gemäß der in Abschnitt 3.1.2 vorgestellten Methodik die Verschattungen mit Hilfe des Signals

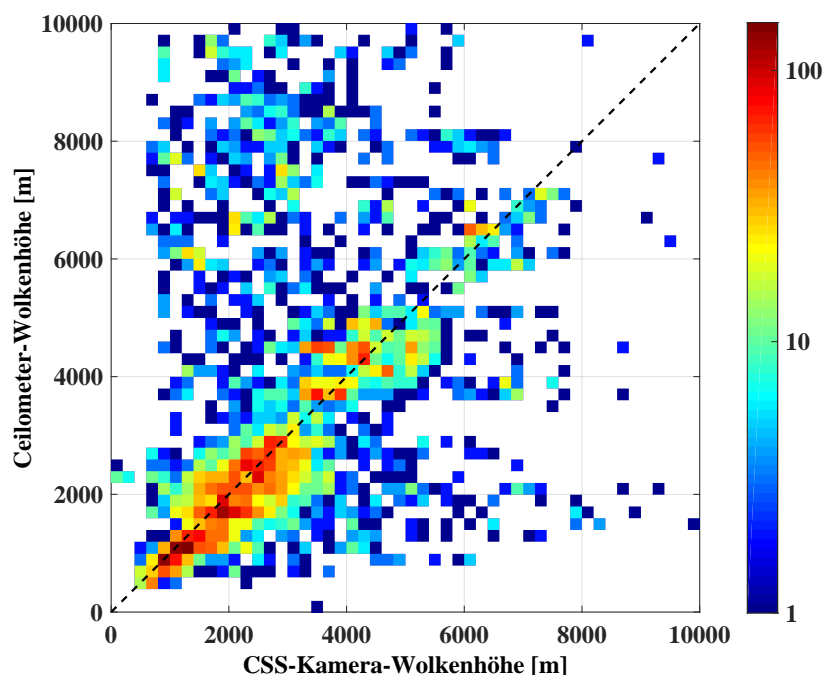


Abbildung 4.20: Dargestellt sind die Ceilometer-Messungen über den Messungen des CSS-Kamera-Systems. Die einzelnen Wertepaare sind in Klassen mit einer Breite von je 200 m subsumiert. Die logarithmische Farbskalierung bezieht sich auf die absolute Anzahl an Messungen pro Klasse.

eines CSS-Einstrahlungssensors bestimmt. Der jeweiligen Verschattung werden die Messungen zugeordnet, welche zeitlich zwischen Anfangs- und Endzeitpunkt der Verschattung liegen zuzüglich einer Zeittoleranz von ± 10 Minuten. Eine methodische Schwäche dieser Auswertung ist, dass die Wolke, die den Einbruch des Sensorsignals verursacht und damit die Verschattung charakterisiert, nicht die Wolke ist, deren Höhe gemessen wird. Bei zeitlich und räumlich konstanten meteorologischen Bedingungen entfällt diese methodische Schwäche. In Tabelle 4.1 sind die Fehlergrößen RMSE, MAE sowie BIAS für alle Messwerte der 12 Verschattungsklassen dargestellt. Kleine Fehler ergeben sich bei Verschattungen mit einer Dauer von bis zu 300 Sekunden und einer Schattenstärke von über 30 %. Der RMSE liegt bei diesen 4 Verschattungsklassen im Bereich von 1112 bis 2040 m. Für Nowcasting-Anwendungen sind diese Klassen von besonderer Relevanz, da die zugehörigen Verschattungen große Gradienten in der Einstrahlungsleistung induzieren.

In Abbildung 4.22 sind die absoluten Messdifferenzen für die 4 besonders relevanten Verschattungsklassen dargestellt. Die Messdifferenzen sind dabei nach ihrem Betrag aufsteigend sortiert aufgetragen. Für Verschattungen mit einer Schattenstärke von mehr als 60 % und einer Verschattungsdauer von weniger als 60 Sekunden (schwarz)

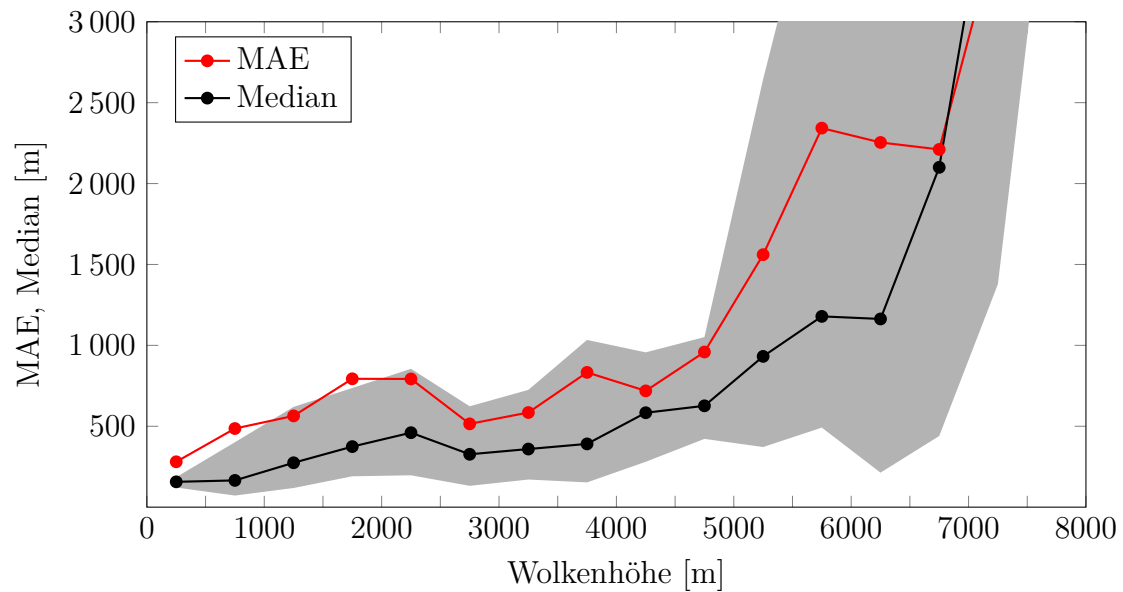


Abbildung 4.21: Dargestellt ist die gemittelte absolute Messdifferenz (MAE) und der Median aller Messdifferenzen. Die Messungen sind zu Intervallen von je 500 m zusammengefasst. Außerdem ist der Bereich zwischen dem unteren und oberen Quantil aller Messdifferenzen für jedes Intervall in grau eingezeichnet. Für Wolkenhöhen von weniger als 5000 m weisen 50 % der Messungen (Median) eine Abweichung von weniger als 600 m zur Ceilometer-Messung auf, für 75 % der Messungen (oberes Quantil) verbleibt die Messdifferenz zur Ceilometer-Messung unterhalb von 1100 m.

Tabelle 4.1: Dargestellt sind die Fehlergrößen der Höhenbestimmung für 12 Verschattungsklassen. Negative Werte für den BIAS deuten an, dass die vom CSS-Kamera-System ermittelte Höhe systematisch niedriger als die Ceilometer-Messung ist.

RMSE [m]					
		Verschattungsdauer [s]			
		< 60	60 – 300	300 – 600	> 600
Schatten- stärke	> 60 %	1174	1112	2362	1784
	30 – 60 %	1378	2040	2590	2922
	< 30 %	2335	3073	5016	4981

MAE [m]					
		Verschattungsdauer [s]			
		< 60	60 – 300	300 – 600	> 600
Schatten- stärke	> 60 %	582	632	1362	977
	30 – 60 %	737	1114	1456	1918
	< 30 %	1313	1934	3868	4855

BIAS [m]					
		Verschattungsdauer [s]			
		< 60	60 – 300	300 – 600	> 600
Schatten- stärke	> 60 %	332	– 78	141	– 238
	30 – 60 %	209	279	419	1053
	< 30 %	640	984	3123	– 1112

betragen die Messdifferenzen bei jeder zweiten Messung weniger als 307 m und bei 75 % der Messungen weniger als 505 m, wie durch die gestrichelten Linien angedeutet ist. Bei den übrigen 3 Verschattungsklassen sind die zugehörigen Verläufe aufgrund der größeren Messdifferenzen flacher. In Abbildung 4.23 sind zu den gleichen 4 Verschattungsklassen die zugehörigen Streudichte-Diagramme dargestellt. Im Anhang A.3 sind die Streudichte-Diagramme der übrigen 8 Verschattungsklassen dargestellt.

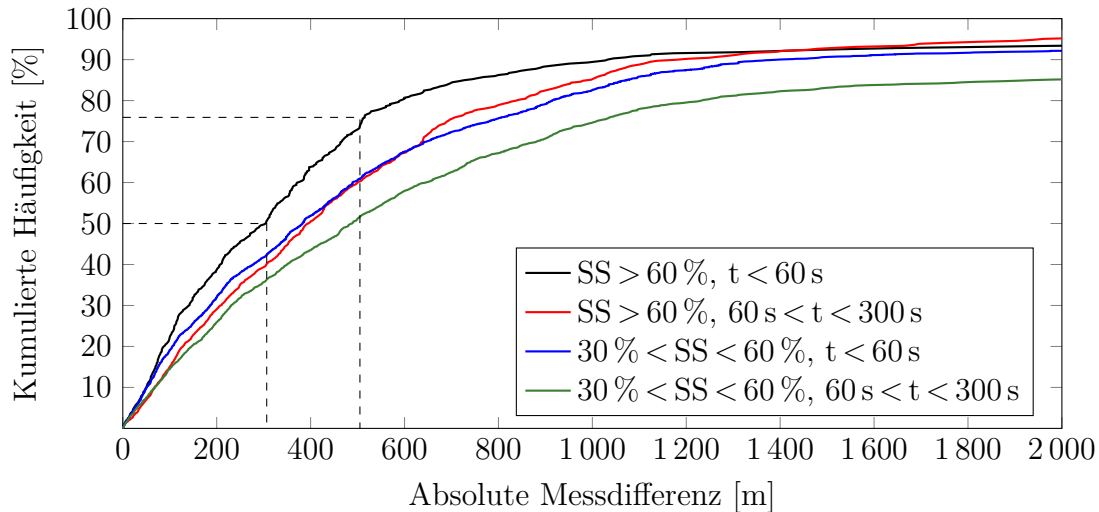


Abbildung 4.22: Dargestellt sind aufsteigend sortiert die absoluten Messdifferenzen für 4 Verschattungsklassen. Für Verschattungen mit einer Schattenstärke von mehr als 60 % und einer Verschattungsdauer von weniger als 60 Sekunden (schwarzer Verlauf) betragen die Messdifferenzen bei jeder zweiten Messung weniger als 307 m und bei 75 % der Messungen weniger als 505 m (gestrichelte Linien).

In den bisherigen Betrachtungen wurden die einzelnen Messungen des CSS-Kamera-Systems mit den Ceilometer-Messungen verglichen. Zeitpunkte, zu denen keine Messung des CSS-Kamera-Systems vorliegt, hatten keinen quantitativen Einfluss auf die Validierungsergebnisse. Bei der Verwendung des CSS-Kamera-Systems zur Kurzfristvorhersage solarer Einstrahlung muss für jeden Zeitpunkt, an dem eine Wolke beobachtet wird, eine Wolkenhöhe abrufbar sein. Aus diesem Grunde wird im Folgenden ein modifiziertes CSS-Kamera-System betrachtet. Bei diesem System wird kontinuierlich ein Messwert ausgegeben. Wenn zu einem Zeitpunkt keine Wolkenhöhe ermittelt werden konnte, wird die letzte berechnete Wolkenhöhe zurückgegeben. Auf diese Weise wird zu jeder Ceilometer-Messung eine Wolkenhöhe durch das CSS-Kamera-System ausgegeben. Für die 70 Tage ergeben sich auf diese Weise 58723 Messpaare aus CSS-Kamera-System und Ceilometer-Messung. Der RMSE beträgt hierbei 3328 m, der MAE 2254 m und der BIAS 256 m. Das Ergebnis für alle Messpaare ist in Abbildung 4.24 als Streudichte-Diagramm dargestellt.

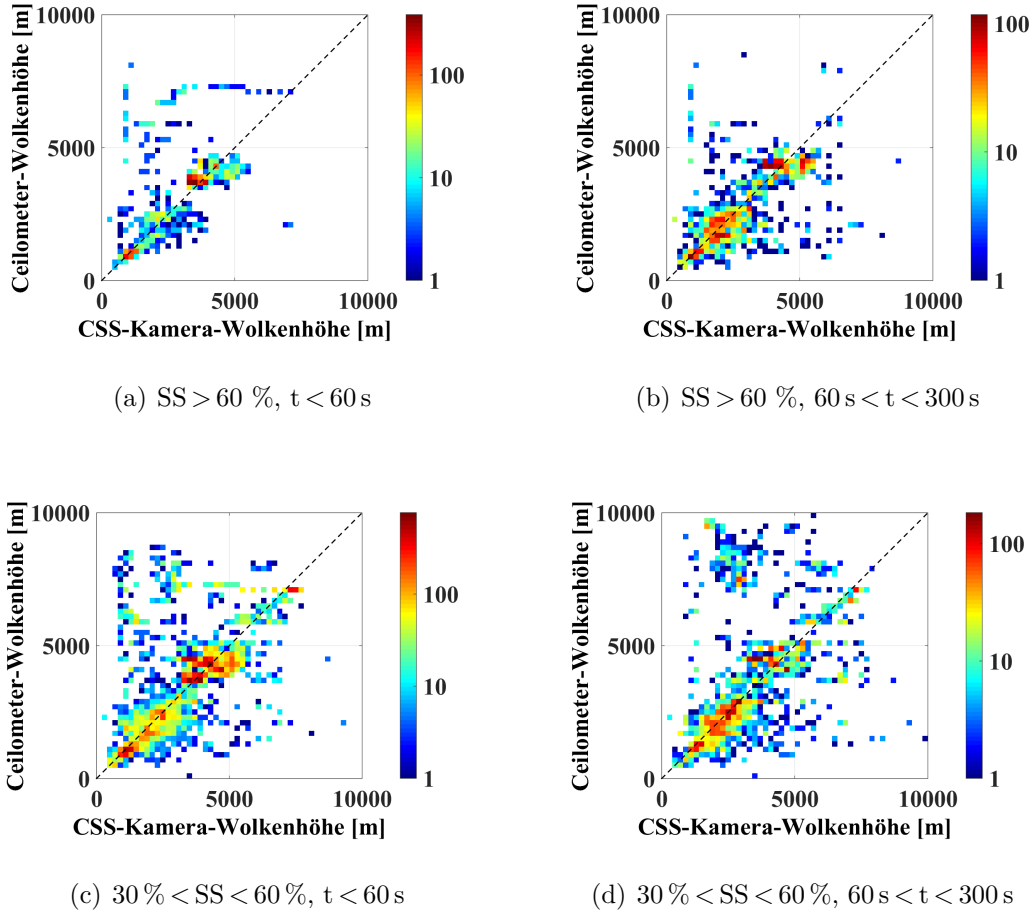


Abbildung 4.23: Dargestellt sind die Streudichte-Diagramme für die 4 Verschattungsklassen mit einer Schattenstärke (SS) von über 30 % und einer Verschattungsdauer (t) von weniger als 300 Sekunden. Die einzelnen Wertepaare sind in Klassen mit einer Breite von je 200 m subsumiert. Die Farbskalierung bezieht sich auf die absolute Anzahl an Messungen pro Klasse.

In der Literatur wird erstmals in Wang u. a. (2016) eine Methode zur Wolkenhöhenbestimmung mit Hilfe eines CSS und einer Wolkenkamera vorgestellt. Bei diesem System werden ebenfalls die Wolkenkamerabilder zunächst segmentiert und eine Verschiebung der Wolken im Kamerabild mittels Kreuzkorrelation bestimmt. Aus der Verschiebung wird eine Pixelgeschwindigkeit v_{Pixel} des Wolkenfeldes in Pixel/s ermittelt. Zur Bestimmung der Wolkenhöhe h wird der Zusammenhang

$$h = \frac{v_{CSS} N}{2v_{Pixel} \tan \theta} \quad (4.24)$$

verwendet, wobei θ dem Zenitwinkel des Sichtfelds der Wolkenkamera entspricht, v_{CSS} der Wolkengeschwindigkeit in m/s und N der Anzahl der Pixel des segmentierten Bildausschnitts in einer Dimension. Das System wird in San Diego, Kalifornien

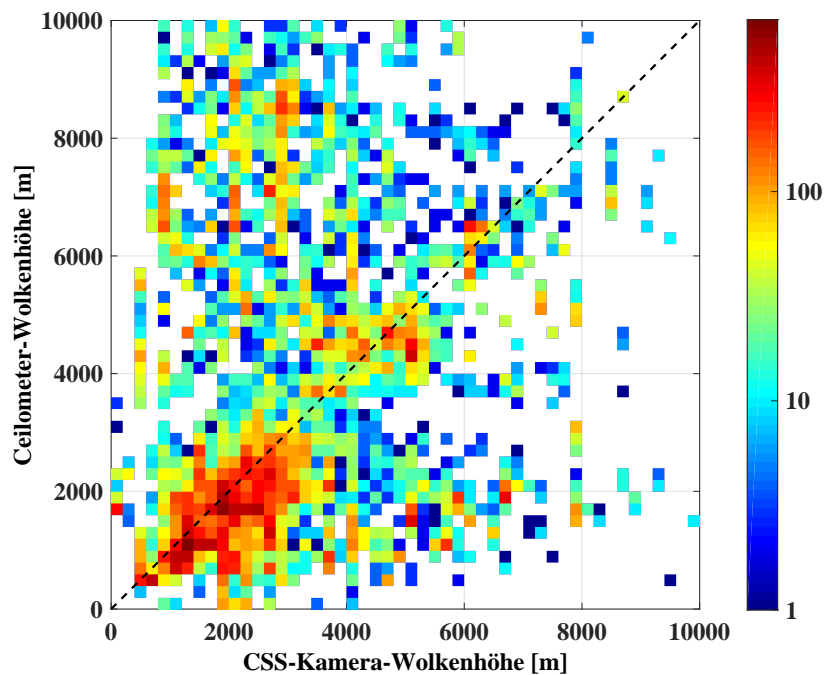


Abbildung 4.24: Dargestellt sind die Ceilometer-Messungen über den Messungen des CSS-Kamera-Systems für das modifizierte System mit kontinuierlicher Messwertausgabe. Die einzelnen Wertepaare sind in Klassen mit einer Breite von je 200 m subsumiert. Die logarithmische Farbskalierung bezieht sich auf die absolute Anzahl an Messungen pro Klasse.

in unmittelbarer Küstennähe für 27 Tage getestet. An diesem Standort werden vor allem Kumuluswolken mit einer Höhe von unter 1000 m beobachtet. Die Höhenmessungen werden ebenfalls mit Hilfe eines Ceilometers validiert. Das System zeigt für die ausgewählten 27 Tage einen auf die durchschnittliche Wolkenhöhe bezogenen RMSE von 17 %. Für Tage mit einer durchschnittlichen Wolkenhöhe von unter 1000 m verbleibt der RMSE stets unter 200 m.

In Killius u. a. (2015) wird eine Wolkenhöhenberechnung ebenfalls für den Standort der PSA durchgeführt. Als Berechnungsmethode werden numerische Wettervorhersagemodelle verwendet. Es werden Wolkenhöhen für einen Zeitraum von einem Jahr berechnet und mit demselben Ceilometer validiert, welches auch in dieser Arbeit verwendet wird. Über den Gesamtzeitraum wird ein RMSE von 5527 m und ein BIAS von 1092 m erzielt. Bei 50 % der Messungen verbleibt die Differenz zur Ceilometer-Messung unterhalb von 1,5 km. Bei dem in dieser Arbeit untersuchten CSS-Kamera-System sind dies 77 %.

4.4 Fehlerabschätzung

In diesem Abschnitt werden die wesentlichen Fehlereinflüsse bei der Höhenbestimmung durch das CSS-Kamera-System diskutiert. Die Wolkenkamera ist in einem Abstand von 7 m vom Ceilometer und 1,5 m vom CSS installiert. Das Ceilometer bestimmt die Höhe von Wolken, die sich vertikal über ihrem Standort befinden. Die CSS-Messungen basieren jedoch auf Wolken, deren Schatten den CSS überstreichen. Da der Elevationswinkel in Südspanien stets kleiner als 90° ist, befinden sich diese Wolken zum Zeitpunkt der CSS-Messung niemals vertikal über dem Standort des Ceilometers und ziehen in den allermeisten Fällen auch nicht über das Ceilometer hinweg. Um trotzdem eine direkte Höhenvalidierung mit dem Ceilometer zu ermöglichen, wird mit dem CSS-Kamera-System die Höhe der Wolken direkt über dem Ceilometer bestimmt. Es wird dazu angenommen, dass die Geschwindigkeit der Wolken, die vom CSS gemessen werden, der Geschwindigkeit der Wolken über dem Ceilometer entspricht. Für ein homogenes Wolkenfeld ist die Annahme in guter Näherung erfüllt, da die Geschwindigkeit sowohl zeitlich wie örtlich als konstant angenommen werden kann. Bei einer Wolkenhöhe von 2000 m und einem Elevationswinkel von 45° beträgt die Distanz zwischen der Wolke, die vom CSS detektiert wird und Wolken, die sich vertikal über dem Ceilometer befinden, 2000 m. Bei einer Wolkengeschwindigkeit von 10 m/s entspricht dies einer Zeitdifferenz von etwa 3 Minuten. Über dieses Zeitintervall ändert sich die Geschwindigkeit des Wolkenfeldes nur geringfügig. Die Annahme kann jedoch nicht getroffen werden, wenn mehrere Wolkenfelder mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten in verschiedenen Himmelsbereichen beobachtet werden. Die vom CSS gemessene Wolkengeschwindigkeit stimmt dann im Regelfall nicht mit der Geschwindigkeit der Wolken über dem Ceilometer überein. Ein alternativer Ansatz ist, die Wolkenverschiebungen in einem Bildausschnitt um die Sonne zu erfassen. Für die Zeitpunkte der CSS-Messung ist dort die Wolkengeschwindigkeit unmittelbar bekannt. Dieser Ansatz ist jedoch aus den folgenden Gründen problematisch: Zum einen ist die Segmentierung in der Nähe der Sonne häufig sehr ungenau. Der Verlauf der Wolkenberandung kann daher in diesem Teil des Bildes aufgrund der Überbelichtung nur grob abgeschätzt werden, sodass die Berechnung von Wolkenbewegungen sehr fehleranfällig ist. Ein weiteres fundamentales Problem ergibt sich bei der Validierung durch das Ceilometer. Die Wolken, die vom CSS erfasst werden, ziehen in den seltensten Fällen genau über den Standort des Ceilometers hinweg. Würden die Höhen der Wolken bestimmt, welche vom CSS vermessen werden, wäre eine direkte Validierung durch das Ceilometer unmöglich.

Die Verschiebungen der Wolken im Kamerabild werden durch die Methode der Phasenkorrelation erfasst. Hierbei wird eine mittlere Verschiebung der Wolken bestimmt. Formänderungen oder Rotationen der Wolken werden dabei nicht berücksichtigt. Formänderungen resultieren zum einen aus Stauchungsprozessen sowie aus Wolkenbildung und -auflösung.

Eine weitere Unsicherheit ergibt sich aus den vom CSS ermittelten Geschwindigkeiten.

Der Fehler der Geschwindigkeitsmessungen geht linear in die Wolkenhöhe ein. In Fung u. a. (2013) werden die CSS-Messungen durch künstliche sowie natürliche Verschattungen validiert, wobei zur Berechnung der Geschwindigkeiten die Most-Correlated-Pair-Methode zum Einsatz kommt. Für die Messunsicherheit wird ein RMSE von 1,9 m/s bestimmt. Die Messunsicherheit der Geschwindigkeiten hängt jedoch von vielen Faktoren, wie beispielsweise der Wolkengattung, ab. Aufgrund der Streuung der CSS-Messungen werden diese, wie in Fung u. a. (2013) vorgeschlagen, über ein Zeitintervall von 30 Minuten gemittelt.

Eine weitere Fehlerquelle ist die Segmentierung der Wolkenkamerabilder. An vereinzelten Zeitpunkten werden grobe Fehler bei der Segmentierung beobachtet. Diese führen dazu, dass die berechneten Verschiebungen über mehrere Bildpaare stark streuen. Dies wird vom Algorithmus jedoch durch das eingeführte Stabilitätskriterium erkannt und die zugehörigen Berechnungen werden verworfen. Ein häufig auftretendes Problem bei der Segmentierung ist die fehlerhafte Identifizierung einer ringförmigen Wolke um die Sonne. Bei der verwendeten Methodik tritt dieses Problem jedoch nur selten in Erscheinung, da sich der fehlerhafte Bereich bei geringem Elevationswinkel außerhalb des betrachteten Bildausschnitts befindet und daher keinen Einfluss hat. Eine ausführliche Validierung der verwendeten Segmentierungsmethodik findet sich in Kuhn u. a. (2016a).

Wie in Abschnitt 4.1 bereits angesprochen, kann die Bestimmungsgleichung zur Höhenberechnung (Gleichung 4.12) in drei Terme gegliedert werden: Die Wolkengeschwindigkeit v sowie das Zeitintervall zwischen den betrachteten Zeitpunkten Δt geht linear in die Wolkenhöhe ein. Die beiden Winkelpaare aus Azimut und Elevation hingegen fließen nicht-linear ein. Die Beziehung kann zu

$$h = v\Delta t f(\alpha_1, \gamma_1, \alpha_2, \gamma_2) \quad (4.25)$$

abstrahiert werden. Im Folgenden wird der dritte Faktor $f(\alpha_1, \gamma_1, \alpha_2, \gamma_2)$ gesondert diskutiert. Aus einer Grenzwertbetrachtung geht hervor, dass für den Fall zweier identischer Winkelpaare der Ausdruck gegen unendlich strebt

$$\lim_{\alpha_1, \gamma_1 \rightarrow \alpha_2, \gamma_2} f(\alpha_1, \gamma_1, \alpha_2, \gamma_2) = \infty \quad (4.26)$$

Dies führt in Formel 4.12 zu einer unphysikalischen, da unendlich großen, Wolkenhöhe. Die steilen Gradienten nahe der Polstelle induzieren eine weitere Unsicherheit, da die Wolkenhöhe in diesem Bereich stark sensitiv gegenüber kleinen Winkel Fehlern ist. In Abbildung 4.25 ist beispielhaft der Betrag des Winkelterms über ein Paar aus Azimut- und Elevationswinkel aufgetragen. Das andere Winkelpaar wird konstant belassen ($\alpha_2 = 0^\circ, \gamma_2 = 80^\circ$). Für die roten Bereiche ist der Betrag kleiner 10, für die blauen Bereiche zwischen 10 und 20. Für alle 8320 Höhenmessungen ist in Abbildung 4.26 die Häufigkeitsverteilung des Winkelterms in 19 Klassen zwischen 0 und 100 aufgetragen. In 92,9 % der Fälle ist der Betrag des Winkelterms kleiner 20.

Eine Unsicherheit für die Validierung stellt die begrenzte Genauigkeit des verwendeten Ceilometers dar. In dieser Arbeit wird das Modell *CHM 15k NIMBUS* der

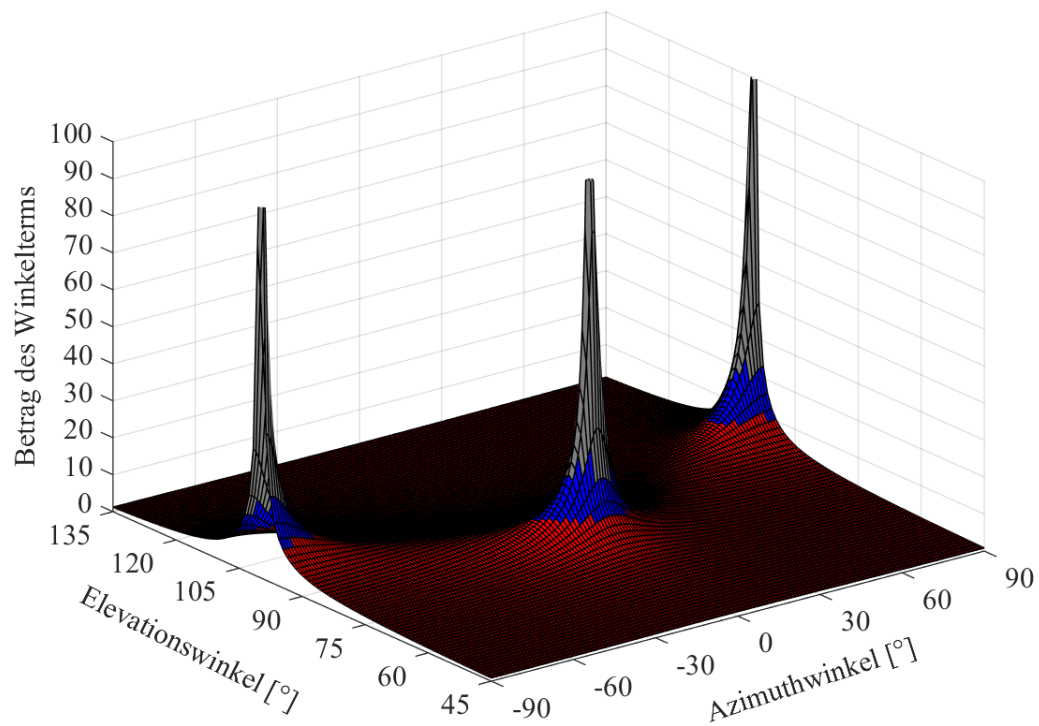


Abbildung 4.25: Dargestellt ist die Abhängigkeit des Winkelterms $f(\alpha_1, \gamma_1, \alpha_2, \gamma_2)$ der Bestimmungsgleichung. Aufgetragen ist der Betrag über den Azimutwinkel α_1 und den Elevationswinkel γ_1 . Das zweite Winkelpaar wird konstant zu $\{\alpha_2 = 0^\circ, \gamma_2 = 80^\circ\}$ angenommen. Für die roten Bereiche ist der Betrag kleiner 10, für die blauen Bereiche zwischen 10 und 20.

Firma *G. Lufft Mess- und Regeltechnik GmbH* verwendet. Dieses Ceilometer wird in Martucci u. a. (2010) gegen ein Ceilometer vom Typ *CL31* des Herstellers *Vaisala* validiert. Es wird ein durchschnittlicher BIAS von 160 m sowie ein erhebliches Maß an Streuung zwischen den Messungen beider Systeme festgestellt.

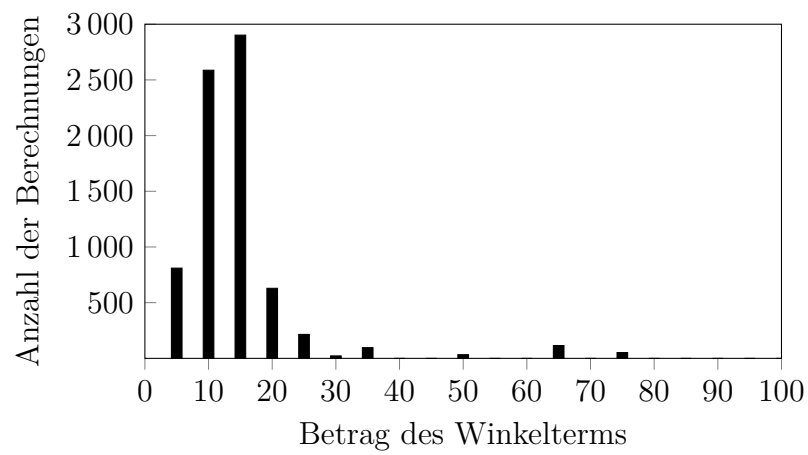


Abbildung 4.26: Dargestellt ist die Häufigkeitsverteilung des Betrags des Winkelterms subsumiert in 19 Klassen zwischen 0 und 100. In 92,9 % der Höhenmessungen ist der Betrag des Winkelterms kleiner 20.

5 Alternative Verfahren zur Wolkenhöhenbestimmung

In diesem Kapitel werden zwei alternative Methoden zur Wolkenhöhenbestimmung untersucht. Die erste Methode basiert in weiten Teilen auf dem in Kapitel 4 vorgestellten CSS-Kamera-System. Einziger Unterschied ist, dass bei der hier vorgestellten Methode die Wolkengeschwindigkeit nicht mit Hilfe des *Cloud Shadow Speed Sensors* (CSS) sondern durch ein auf der PSA bereits installiertes Schattenkamera-System ermittelt wird. Bei dem zweiten betrachteten System wird die Wolkenhöhe mit vier Wolkenkameras ermittelt. Dieses System ist bereits innerhalb eines Nowcasting-Systems implementiert. Im Rahmen dieser Arbeit werden die Wolkenhöhen dieser Methodik erstmalig gegen ein Ceilometer als Referenzsystem validiert.

5.1 Wolken-/Schattenkamera-System

Der in diesem Kapitel beschriebene Ansatz zur Wolkenhöhenbestimmung ist in weiten Teilen identisch zu dem in Kapitel 4 vorgestellten CSS-Kamera-System. Der dort beschriebene Ansatz verwendet eine Wolkenkamera sowie einen CSS. Der CSS übernimmt dabei die Funktion der Wolkengeschwindigkeitsbestimmung. In dem hier vorgestellten Verfahren wird statt des CSS ein bereits auf der PSA installiertes Schattenkamera-System zur Bestimmung der Wolkengeschwindigkeiten verwendet. Das Schattenkamera-System besteht aus 6 Kameras, die von einem 87 m hohen Turm auf den Erdboden des umliegenden Geländes gerichtet sind. Das Zeitintervall zwischen zwei aufgenommenen Bildern beträgt 15 Sekunden. Die Bilder aller 6 Schattenkameras werden in eine gemeinsame Orthogonalprojektion umgerechnet, welche einen Bereich von 4 km² abdeckt. Das resultierende Orthogonalbild wird anschließend mit zwei Referenzbildern verglichen. Ein Referenzbild zeigt das Gelände zu einem Zeitpunkt kompletter Verschattung, das andere Referenzbild zeigt das Gebiet vollkommen schattenfrei. Aus den RGB-Werten der einzelnen Bildpixel sowie dem Einstrahlungssignal eines Pyranometers und eines Pyrhiometers einer Referenzstation werden örtlich aufgelöste Strahlungskarten für die Direkt-Normalstrahlung (*direct normal irradiance*, DNI), die globale Horizontalstrahlung (*global horizontal irradiance*, GHI) sowie die globale Strahlung auf eine geneigte Fläche (*global tilted irradiance*, GTI) erstellt. Eine detaillierte Beschreibung des Schattenkamera-Systems findet sich in Kuhn u. a. (2017) und Kuhn u. a. (2016b). In Abbildung 5.1 ist ein

beispielhaftes Schattenkamerabild, ein aus 6 Kamerabildern berechnetes Orthogonalbild sowie die resultierende DNI-Strahlungskarte dargestellt. Mit Hilfe der Strahlungskarten können Schattenbewegungen auf dem Boden quantitativ erfasst werden. Im folgenden Abschnitt wird erläutert, wie aus diesen Strahlungskarten die Geschwindigkeit und Richtung der Schatten bestimmt wird.

Algorithmus zur Bestimmung der Wolkenbewegungsvektoren

Die mit dem Schattenkamera-System berechneten DNI-Strahlungskarten werden in einem ersten Schritt mit Hilfe eines dynamischen Schwellenwerts in binäre Karten umgewandelt. Dazu werden Bereiche, deren DNI unterhalb des Schwellenwerts liegen, als verschattet und die übrigen als unverschattet angenommen. Der Schwellenwert wird auf 50 % der maximalen DNI bei einem wolkenlosen Himmel festgelegt. Bildpaare, bei dem mindestens ein Bild ausschließlich verschattete oder unverschattete Bereiche enthält, werden nicht weiter ausgewertet, da in diesen Bildern keine sinnvolle Verschiebung der Schatten ermittelt werden kann. Im darauffolgenden Berechnungsschritt wird die mittlere Verschiebung der Schatten in zwei aufeinanderfolgenden Bildern mit Hilfe der Phasenkorrelation bestimmt, welche in Kapitel 2.4 näher beschrieben ist. Ergebnis der Phasenkorrelation ist ein Translationsvektor T , welcher die Verschiebung der beiden Bilder in x- und y-Koordinaten angibt. Ist der Translationsvektor identisch dem Nullvektor, wird der Zeitschritt übersprungen, da keine sinnvolle Geschwindigkeit oder Bewegungsrichtung ermittelt werden kann. Die Verschiebung der Wolken kann durch Überlagerung der beiden Bilder graphisch veranschaulicht werden. Ein Beispiel für eine solche Überlagerung ist in Abbildung 5.2 gezeigt. Das Binärbild oben links zeigt die Position der Schatten zum Zeitpunkt 13:06:30 Uhr. Die dunkelblauen Bereiche stellen Schatten dar, die dunkelgelben unverschattete Gebiete. Als gelber Punkt ist außerdem die Lage des CSS eingezeichnet. Im linken Binärbild ist der CSS unverschattet. Im rechten Binärbild (Zeitpunkt 13:06:45 Uhr) in Abbildung 5.2 ist der Schatten weiter nach Osten gezogen, der CSS ist zu diesem Zeitpunkt verschattet. Der Translationsvektor beträgt für dieses Bildpaar $T = \begin{pmatrix} 25 \\ 0 \end{pmatrix}$, was einer reinen Ost-West-Verschiebung von

$$25 \text{ pixel} \times 5 \frac{\text{m}}{\text{pixel}} = 125 \text{ m} \quad (5.1)$$

entspricht. Das untere Bild zeigt die Überlagerung beider Binärbilder gemäß der berechneten Verschiebung. Bei der Überlagerung können im Allgemeinen vier Fälle (im Folgenden *Klassen* genannt) unterschieden werden:

1. Zwei verschattete Pixel liegen übereinander (gelb).
2. Zwei unverschattete Pixel liegen übereinander (hellblau).
3. Im ersten Bild ist das Pixel verschattet, im späteren Bild jedoch unverschattet (grün).
4. In ersten Bild ist das Pixel unverschattet, im späteren Bild jedoch verschattet (braun).

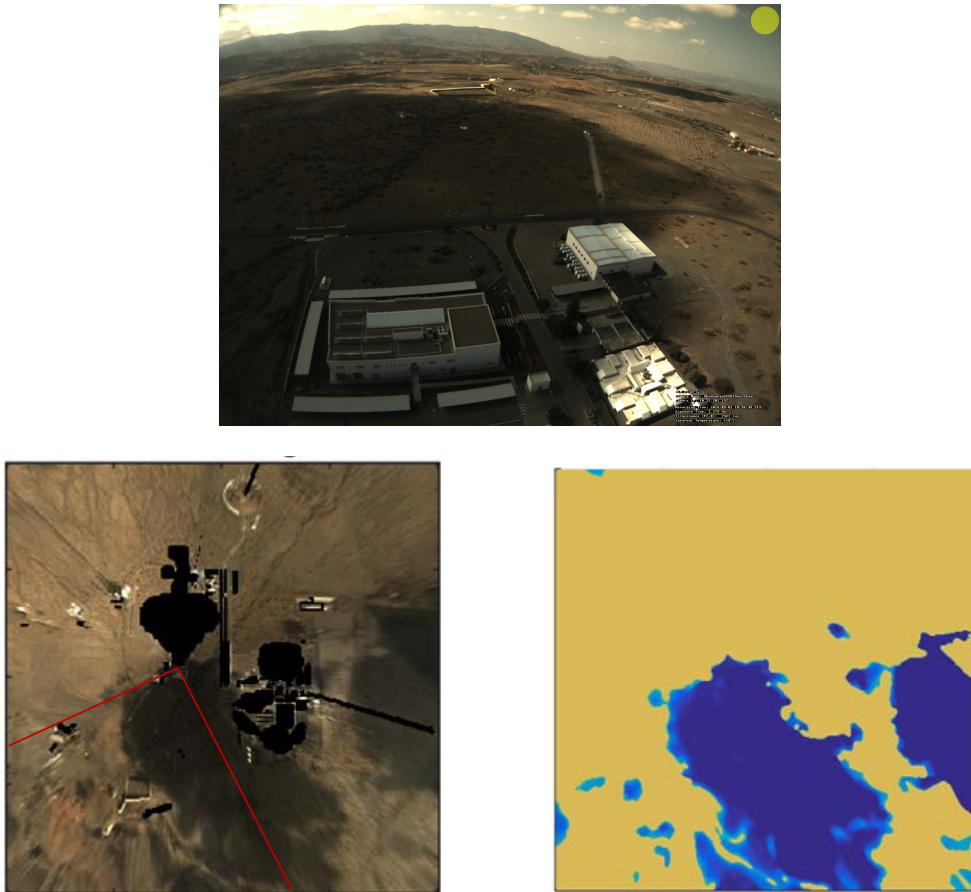


Abbildung 5.1: Das obere Bild zeigt die Aufnahme einer Schattenkamera zum Zeitpunkt 10:36 Uhr am 01.09.2016. Unten links ist das aus 6 Bildern berechnete Orthogonalbild zum gleichen Zeitpunkt dargestellt. Rot hervorgehoben ist das Sichtfeld des oben dargestellten Schattenkamerabilds. Unten rechts ist die resultierende DNI-Strahlungskarte dargestellt. Blaue Pixel stellen Bereiche mit geringer Einstrahlungsleistung dar. Das Orthogonalbild sowie die Strahlungskarte zeigen ein Gebiet von 2×2 km.

In diesem Bildpaar liegen die Umrisse des größten Schattens recht genau übereinander. Im unteren, rechten Teil des Überlagerungsbilds liegen die verschatteten beziehungsweise unverschatteten Bereiche nicht übereinander, was sich in der großen grünen Fläche widerspiegelt: Bei der Betrachtung weiterer Schattenkarten vor und nach diesem Zeitpunkt kann beobachtet werden, dass sich die Wolke unten rechts in kurzer Zeit erheblich verkleinert. Dieses Phänomen der Wolkenauflösung kann durch die verwendete Korrelationsmethode nicht exakt erfasst werden. Grundsätzlich können Verzerrungen im Bild oder rotatorische Bewegungen nicht erfasst werden. In diesem Bildpaar kann eine weitere Fehlerquelle identifiziert werden: Links von der CSS-Position lässt sich ein kleiner, scheinbar unverschatteter Bereich erkennen. Dieser Bereich ist in beiden Binärbildern an der gleichen Position. Bei Betrachtung einer größeren Bildfolge lässt sich erkennen, dass dieser unverschattete Bereich über

mehrere Bildpaare hinweg scheinbar an der gleichen Position verharren. Es handelt sich offensichtlich um einen Fehler in den errechneten Strahlungskarten. Aufgrund des kleinen Ausmaßes des fehlerhaften Bereichs spielt er bei der Berechnung der Verschiebung nur eine untergeordnete Rolle. Um die Überlagerung quantitativ bewerten

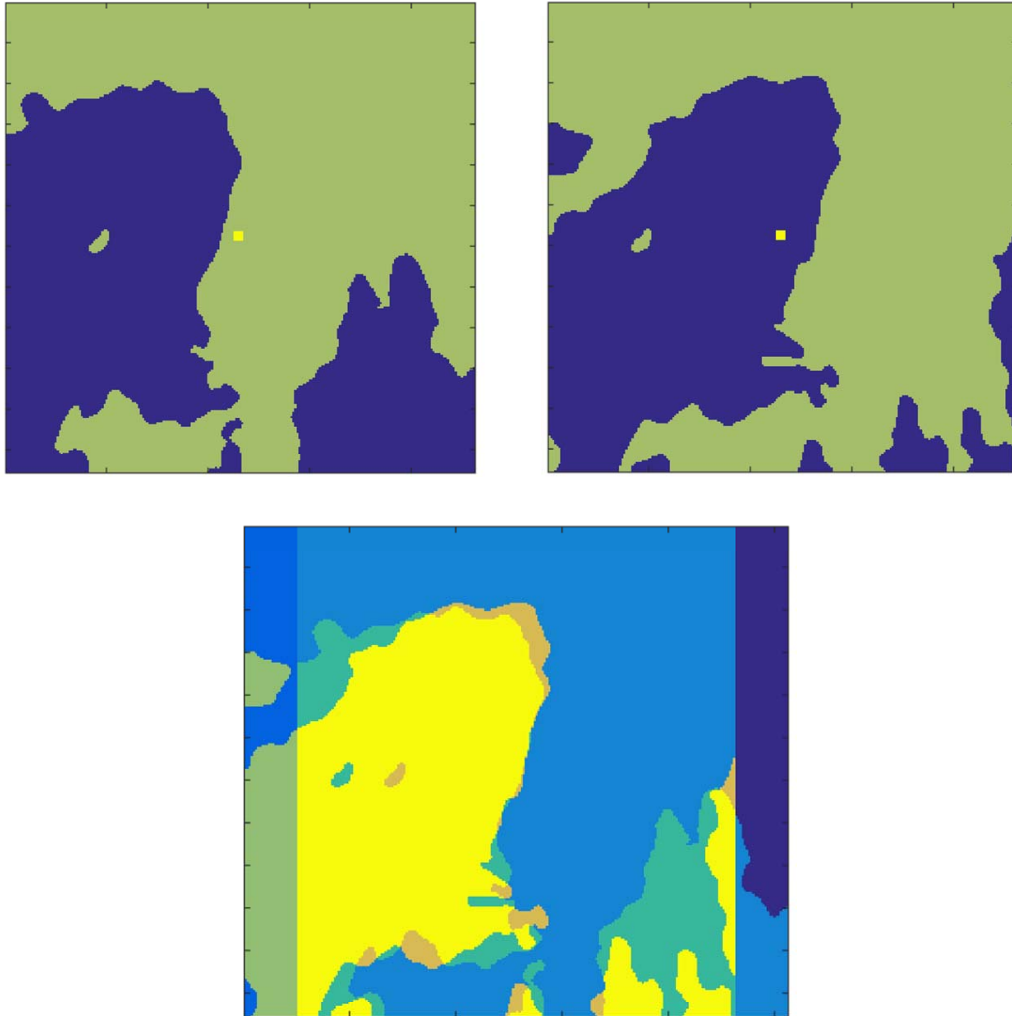


Abbildung 5.2: Dargestellt sind zwei binäre Schattenkarten sowie ihre Überlagerung gemäß der berechneten Verschiebung. Das Binärbild oben links zeigt die Position der Schatten zum Zeitpunkt 13:06:30 Uhr am 23.10.2016. Die dunkelblauen Bereiche stellen Schatten dar, die dunkelgelben unverschattete Gebiete. Der gelbe Punkt symbolisiert die Position des CSS. Die Abbildung oben rechts zeigt die Position der Schatten 15 Sekunden später. Das untere Bild stellt die Überlagerung beider Schattenkarten gemäß der berechneten Verschiebung dar.

zu können, werden auf Basis der vier Klassen vier charakteristische Verhältnisse ρ_i definiert. Dazu wird die Gesamtzahl der Pixel einer Klasse k_i durch die Gesamtzahl

der Pixel aller Klassen dividiert:

$$\rho_i = \frac{k_i}{\sum_{i=1}^4 k_i} \quad (5.2)$$

Bei einer perfekten Überlagerung der Bilder ist die Summe der Verhältnisse der Klassen 1 und 2 (gelbe und hellblaue Bereiche in Abbildung 5.2) identisch eins und die Summe der Klassen 3 und 4 (grün und braun) gleich Null. Die Summe der Verhältnisse der Klassen 1 und 2 kann als Maß für die Güte der Überlagerung aufgefasst werden. Folglich wird ein Gütefaktor m eingeführt, welcher als

$$m = \rho_1 + \rho_2 \quad (5.3)$$

definiert wird. Für jedes Bildpaar wird dieser Gütefaktor m berechnet. Wenn der Gütefaktor unterhalb eines Schwellenwerts \hat{m} liegt, wird der aktuelle Zeitschritt übersprungen. Der Schwellenwert wird empirisch zu $\hat{m} = 0,7$ festgelegt. In Abbildung 5.2 beträgt der Gütefaktor

$$m = \rho_1 + \rho_2 = 0,346 + 0,518 = 0,864 \quad (5.4)$$

Ferner werden Bildpaare ignoriert, in denen die verschatteten oder die unverschatteten Bereiche stark überwiegen, da diese besonders fehleranfällig sind. Häufig werden kleine Verschattungen aufgrund fehlender zusätzlicher Bildinformationen komplett falsch zugeordnet. Ein Beispiel ist in Abbildung 5.3 dargestellt. Zur Detektierung derartiger Bildpaare wird der Verschattungsgrad VG (in Anlehnung an den Bewölkungsgrad in Wolkenkamerabildern) berechnet. Der Verschattungsgrad wird zu

$$VG = \frac{p_v}{p_u + p_v} \quad (5.5)$$

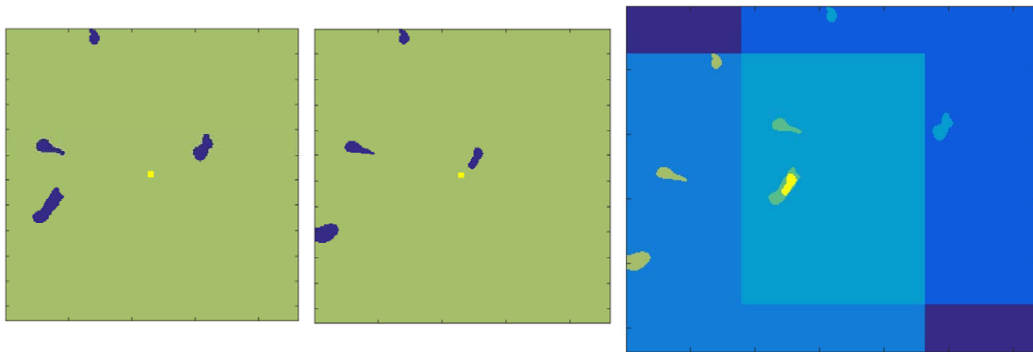


Abbildung 5.3: Links sind zwei binäre Schattenkarten zu den Zeitpunkten 12:57:00 und 12:57:15 Uhr am 28.09.2016 dargestellt. Das rechte Bild zeigt die Überlagerung gemäß der berechneten Verschiebung. Aufgrund der geringen Struktur in den Bildern werden die Schatten durch das Korrelationsverfahren falsch zugeordnet. Der Verschattungsgrad beträgt für dieses Bildpaar 0,38 %.

definiert, wobei p_v und p_u der Anzahl der Pixel, die als verschattet beziehungsweise unverschattet identifiziert werden, entspricht. Unterschreitet der Verschattungsgrad eines der Bilder den Schwellenwert von $\hat{\varphi} = 5\%$ oder überschreitet er den Schwellenwert von $1 - \hat{\varphi} = 95\%$ wird das Bildpaar übersprungen. Das in Abbildung 5.3 gezeigte Beispiel weist einen Verschattungsgrad von $\varphi = 0,38\%$ auf.

Ist die Verschiebung der Bilder bekannt, sind auch diejenigen Pixel bekannt, welche bei einer rein translatorischen Verschiebung der Bilder die Position des CSS überstreichen würden. Hierfür wird angenommen, dass die Form der Schatten unverändert bleibt. In Abbildung 5.4 ist für einen beispielhaften Zeitstempel das zeitlich erste der beiden Binärbilder dargestellt. Als roter Punkt eingezeichnet ist die CSS-Position. Der Schatten bewegt sich im Bild von unten links nach oben rechts mit dem berechneten Translationsvektor $T = \begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 24 \\ 5 \end{pmatrix}$. In gelb sind die Pixel hervorgehoben, welche bei dieser Verschiebung (24 Pixel in x-Richtung und 5 Pixel in y-Richtung) die Position des CSS überstreichen würden. Mit dieser Information kann der genaue Zeitpunkt der Verschattung des CSS innerhalb des 15-Sekunden-Intervalls berechnet werden. In diesem Beispiel ist der CSS etwa die Hälfte des Zeitintervalls zwischen den Bildaufnahmen unverschattet. Zur Bestimmung des Verschattungszeitpunkts wird anhand der gelb hervorgehobenen Pixel einzeln geprüft, wo der Übergang zwischen verschattetem und unverschattetem Zustand stattfindet. Auf diese Weise wird die Grenze der Verschattung identifiziert. Der Zeitpunkt der Verschattung wird anschließend über lineare Interpolation ermittelt. Im dargestellten Bild sind ausgehend von der CSS-Position zunächst 16 Pixel unverschattet und die folgenden 18 Pixel verschattet. Der Zeitpunkt der Verschattung würde dementsprechend zu

$$t_s = t_1 + \frac{16}{16 + 18} \Delta t_{1,2} = 13:51:52 \text{ Uhr} \quad (5.6)$$

bestimmt werden, wobei t_1 der Aufnahmezeit des ersten Binärbilds entspricht (hier: 13:51:45 Uhr) und $\Delta t_{1,2}$ der Zeitdifferenz zwischen den Bildern (15 Sekunden). Auf diese Weise können falls vorhanden mehrere Wechsel zwischen verschattetem und unverschattetem Zustand innerhalb zweier Bilder identifiziert werden.

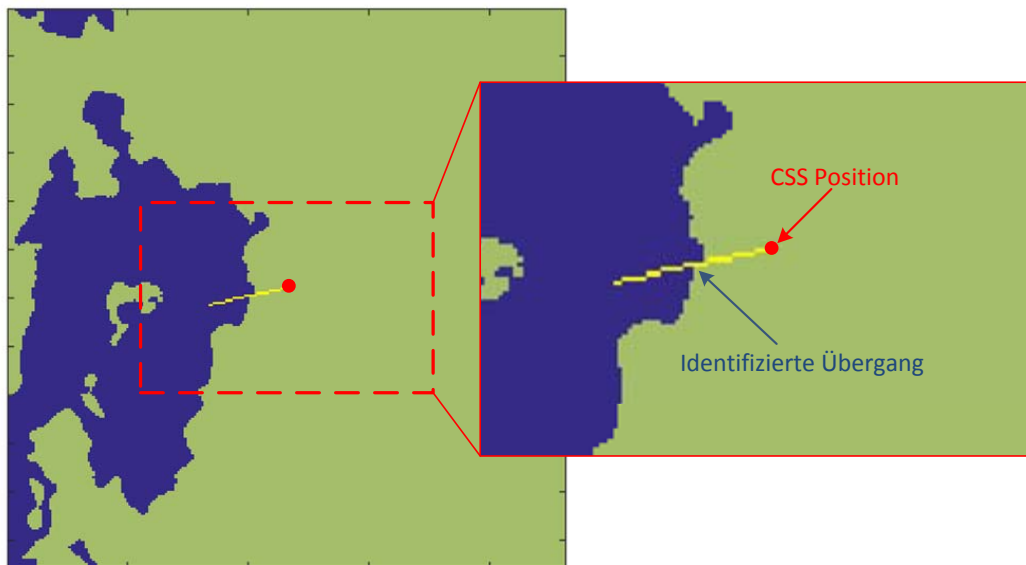


Abbildung 5.4: Dargestellt ist das Vorgehen zur Berechnung des genauen Verschattungszeitpunkts des CSS zwischen zwei Schattenskamera-Bildern. Dargestellt ist das zeitlich erste Bild, bei dem der CSS noch unverschattet ist. In gelb sind die Pixel hervorgehoben, welche bei der berechneten Verschiebung (24 Pixel in x-Richtung und 5 Pixel in y-Richtung) die Position des CSS im Zeitintervall zwischen den Bildern (15 Sekunden) überstreichen. In diesem Beispiel sind ausgehend von der Position des CSS zunächst 16 Pixel unverschattet und die folgenden 18 Pixel verschattet. Über lineare Interpolation wird der genaue Verschattungszeitpunkt zu $\frac{16}{18+16} \times 15 \text{ Sekunden} = 7,1 \text{ Sekunden}$ nach Aufnahme des ersten Bilds bestimmt.

Ergebnisse

Für die Wolkenhöhenbestimmung mit Hilfe des Wolken-/Schattenkamera-Systems werden 7 beispielhafte Tage mit unterschiedlichen Bewölkungssituationen ausgewertet. Da die Wolkengeschwindigkeit linear in die Berechnung der Wolkenhöhe eingeht (vergleiche Formel 4.12), ist für den Vergleich mit dem CSS-Kamera-System eine Gegenüberstellung zwischen den vom CSS und vom Schattenkamera-System ermittelten Geschwindigkeiten aufschlussreich. In Abbildung 5.5 sind die Geschwindigkeiten beider Systeme gegeneinander aufgetragen. Bei dieser Auswertung werden Messungen, welche 2 Minuten auseinander liegen als gleichzeitig betrachtet und miteinander verglichen. Die Geschwindigkeiten weisen einen RMSE von 2,9 m/s, einen MAE 2,3 m/s und einen BIAS von 1,6 m/s auf.

Die vom Wolken-/Schattenkamera-System gemessenen Wolkenhöhen werden durch ein Ceilometer validiert. Das zugehörige Streudichte-Diagramm ist in Abbildung 5.6 dargestellt. Der RMSE beträgt 592 m, der MAE 309 m und der BIAS 71 m. Bei

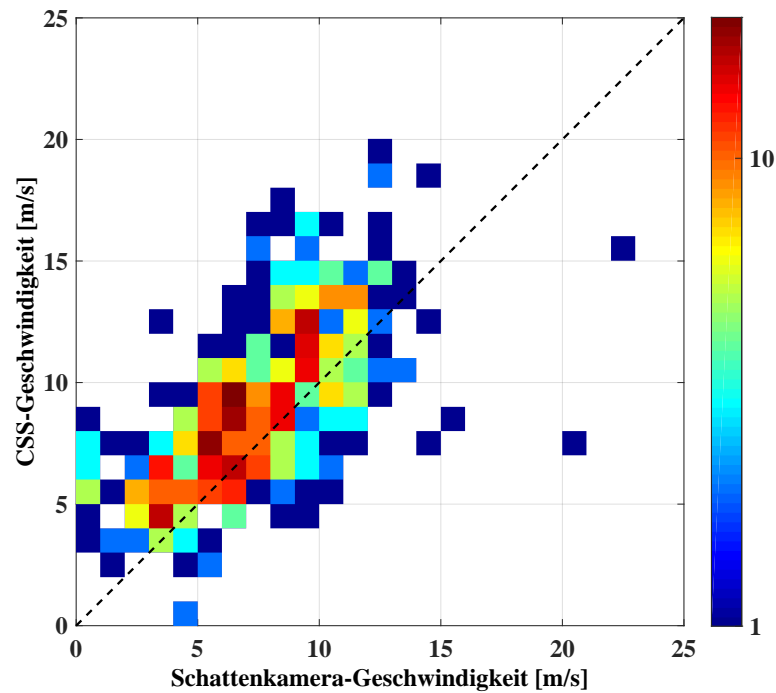


Abbildung 5.5: Dargestellt sind die CSS-Geschwindigkeitsmessungen über den Messungen des Schattenkamera-Systems. Die einzelnen Wertepaare sind in Klassen mit einer Breite von je 1 m/s subsumiert. Die logarithmische Farbskalierung bezieht sich auf die absolute Anzahl an Messungen pro Klasse.

Wolken mit einer Höhe von über 5000 m weichen die berechneten Höhen deutlich weniger von der Ceilometer-Messung ab als die Messungen des CSS-Kamera-System (vergleiche Abschnitt 4.3). Die Ceilometer-Messungen mit einer Höhe von über 8000 m werden am 01.09.2016 registriert. Die ermittelten Wolkenhöhen für diesen Tag sind in Abbildung 5.7 dargestellt. In rot sind die Höhen des CSS-Kamera-Systems dargestellt, in blau die des Wolken-/Schattenkamera-Systems und in schwarz die des Ceilometers. Für die Kumuluswolken auf einer Höhe von weniger als 2000 m zeigen beide Systeme eine gute Übereinstimmung mit den Ceilometer-Messungen. Bei den Wolken ab 14:00 Uhr handelt es sich um Cirrus-Wolken auf einer Höhe von etwa 8000 m. Diese werden vom CSS-Kamera-System deutlich zu gering eingeschätzt, da die Wolkengeschwindigkeit durch den CSS mit etwa 8 m/s zu gering gemessen wird. Die Wolkengeschwindigkeit, welche mit dem Schattenkamera-System ermittelt wird, beträgt etwa 20 m/s. Dadurch sind die ermittelten Wolkenhöhen wesentlich präziser als die des CSS-Kamera-Systems. Die Segmentierung und Bewegungserfassung ist für beide Systeme identisch.

In Abbildung 5.8 ist das Ergebnis für den 21.08.2016 dargestellt. In blau sind die ermittelten Höhen mit dem Wolken-/Schattenkamera-Systems dargestellt, in

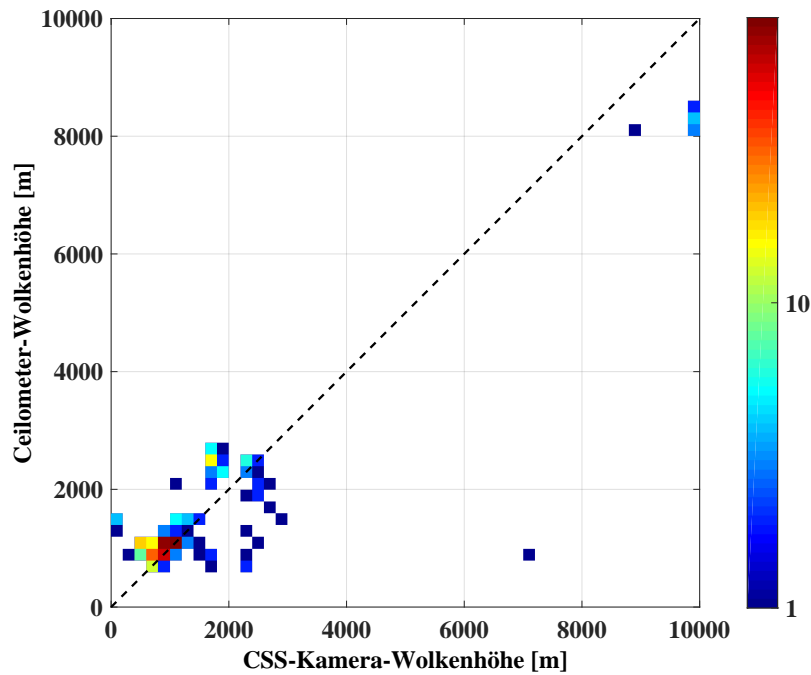


Abbildung 5.6: Dargestellt sind die Ceilometer-Messungen über den Messungen des Wolken-/Schattenkamera-Systems. Die einzelnen Wertepaare sind in Klassen mit einer Breite von je 200 m subsumiert. Die logarithmische Farbskalierung bezieht sich auf die absolute Anzahl an Messungen pro Klasse.

schwarz die Ceilometer-Messungen und in rot die Höhen, welche mit dem CSS-Kamera-System ermittelt werden. Da das Schattenkamera-System an diesem Tag leicht geringere Wolkengeschwindigkeiten als der CSS misst, liegen die Wolkenhöhen beim Wolken-/Schattenkamera-System im Mittel unter denen des CSS-Kamera-Systems.

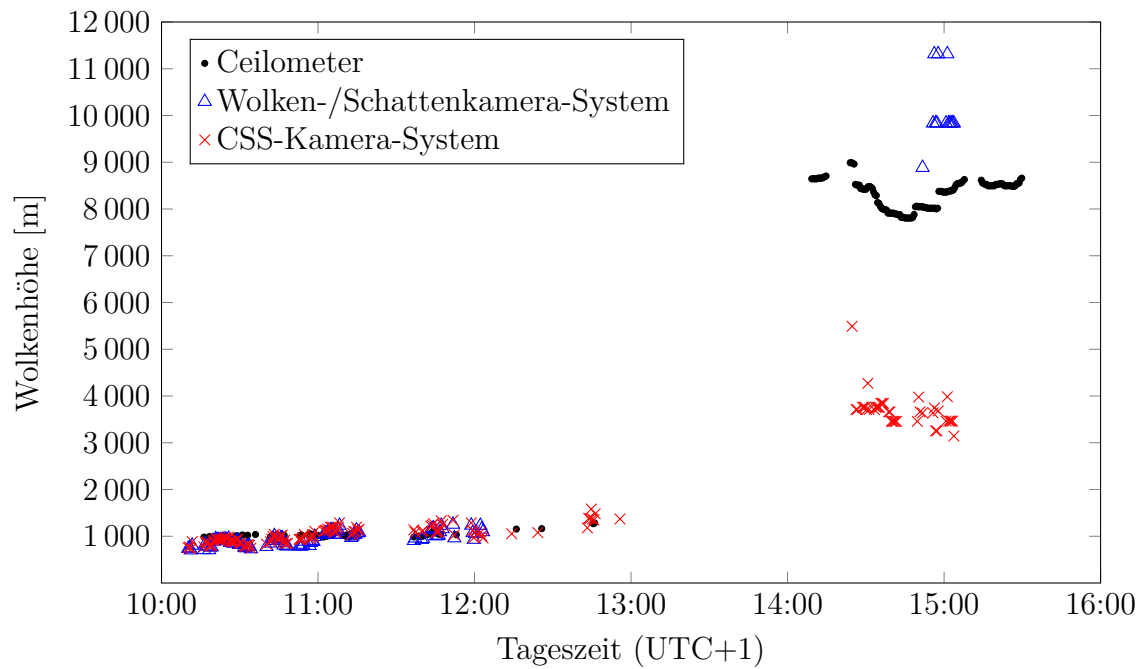


Abbildung 5.7: Dargestellt sind die Ergebnisse der Wolkenhöhenbestimmung mit dem Wolken-/Schattenkamera-System im Vergleich zum CSS-Kamera-System für den 01.09.2016. Die tiefen Kumuluswolken bis 13:00 Uhr werden von beiden Systemen präzise vermessen. Die Cirrus-Wolken ab 14:00 Uhr werden vom CSS-Kamera-System deutlich unterschätzt, was auf eine zu geringe Wolkengeschwindigkeit (8 m/s) zurückgeführt werden kann. Die Geschwindigkeitsmessungen des Schattenkamera-Systems betragen etwa 20 m/s, die Wolkenhöhe stimmt daher wesentlich besser mit den Ceilometer-Messungen überein.

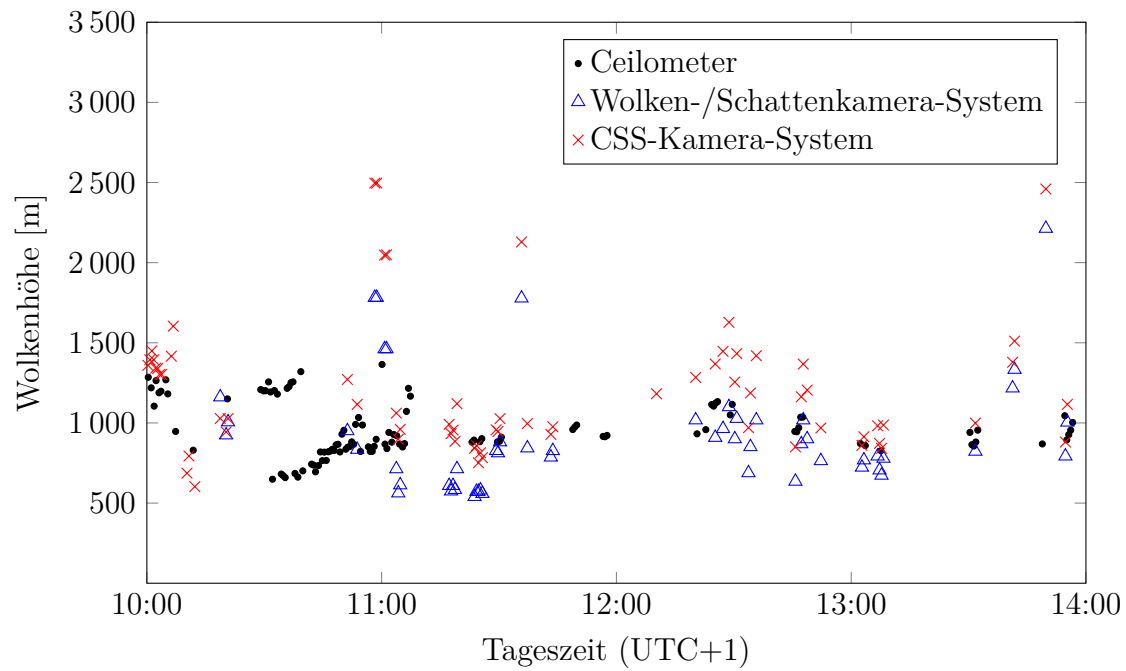


Abbildung 5.8: Dargestellt sind die Ergebnisse der Wolkenhöhenbestimmung mit dem Wolken-/Schattenkamera-System im Vergleich zum CSS-Kamera-System für den 21.08.2016. Da das Schattenkamera-System an diesem Tag leicht geringere Wolkengeschwindigkeiten als der CSS misst, liegen die Wolkenhöhen beim Wolken-/Schattenkamera-System im Mittel unter denen des CSS-Kamera-Systems.

5.2 4-Kamera-System

In diesem Abschnitt wird ein System zur Wolkenhöhenbestimmung basierend auf 4 Wolkenkameras validiert. Als Referenzsystem kommt das in Kapitel 2.3.1 vorgestellte Ceilometer zum Einsatz. Das System ist im Rahmen eines Nowcasting-Programms implementiert (Oberländer u. a. (2015), Wilbert u. a. (2016)) und basiert auf dem sogenannten *Voxel Carving* (Kutulakos u. Seitz (2000)). Bei diesem Ansatz wird die 3-dimensionale Form von Objekten aus den Bildern mehrerer an unterschiedlichen Orten befindlichen Kameras bestimmt. Die zu Grunde liegende Idee ist in Abbildung 5.9 anhand zweier Kameras skizziert. Abgebildet ist eine Wolke, die von den beiden Kameras C_1 und C_2 erfasst wird. Die resultierende Form und Lage des modellierten Wolkenobjekts resultiert aus der Schnittmenge beider Sichtkegel und ist in grün dargestellt. Auf der rechten Seite ist die horizontale Querschnittsfläche des Wolkenobjekts über der Höhe aufgetragen. Der Punkt, an dem die Steigung des Verlaufs eine starke Änderung aufweist, dient zur Festlegung der Wolkenhöhe h . Die Modellierung der einzelnen Wolkenobjekte erfolgt in einem 3-dimensionalen

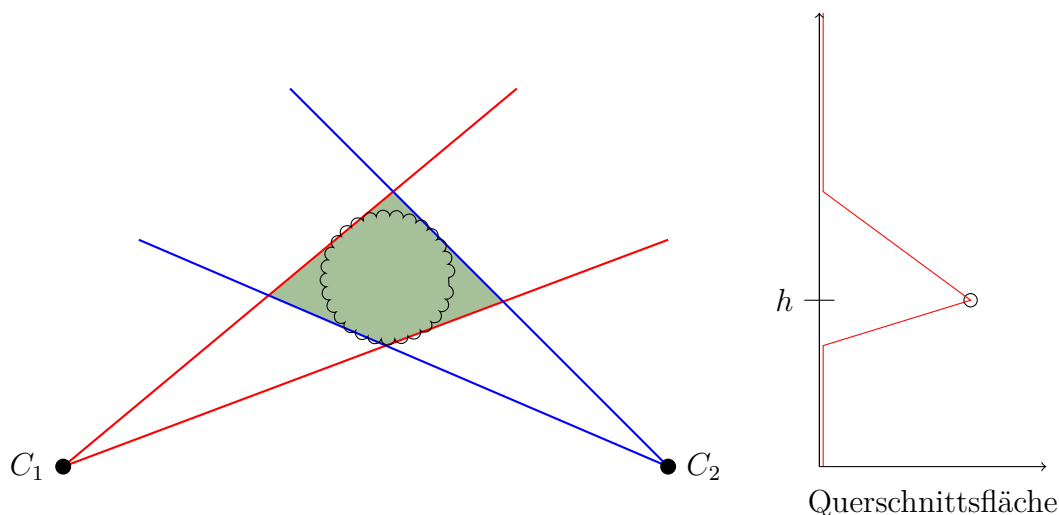


Abbildung 5.9: Dargestellt ist die Modellierung einer Wolke mit Hilfe von 2 Kameras mit der *Voxel Carving*-Methode. Eingezeichnet sind die Sichtkegel der beiden Kameras C_1 und C_2 . In grün dargestellt ist das aus der Schnittmenge der Sichtkegel modellierte Wolkenobjekt. Auf der rechten Seite ist die horizontale Querschnittsfläche des Wolkenobjekts über der Höhe aufgetragen. Der Punkt, an dem die Steigung des Verlaufs eine starke Änderung aufweist, dient zur Festlegung der Wolkenhöhe h .

Gitter mit definierten Ausmaßen. Die Zellauflösung des gewählten Gitters in vertikaler Richtung entspricht der maximalen Höhenauflösung und beträgt 33 m. Zur Validierung werden die Wolkenobjekte betrachtet, die sich vertikal über der Position des Ceilometers befinden. Es wird die Höhe des niedrigsten Wolkenobjekts über dem

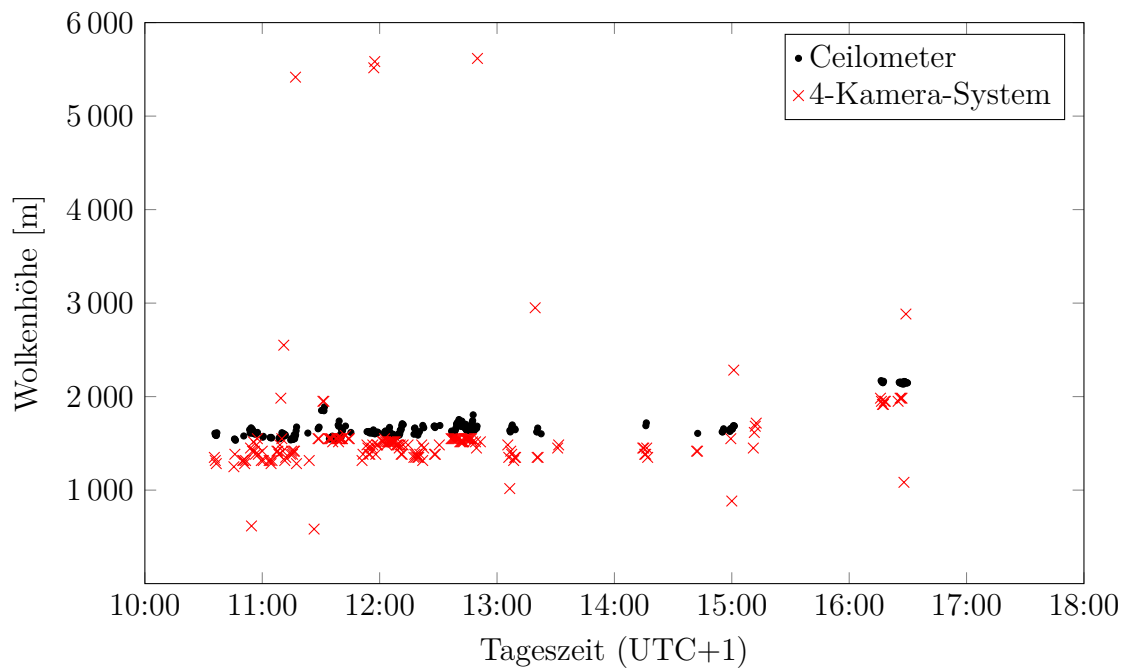


Abbildung 5.10: Dargestellt sind die Ergebnisse der Wolkenhöhenbestimmung des 4-Kamera-Systems für den 19.09.2015. Für diesen Tag beträgt der RMSE 277 m, der MAE 213 m und der BIAS 166 m.

Ceilometer ermittelt und mit der Ceilometer-Messung verglichen. In Abbildung 5.10 sind die Ergebnisse der Validierung für den 19.09.2015 dargestellt. In schwarz sind die Ceilometer-Messungen dargestellt, in rot die ermittelten Höhen des 4-Kamera-Systems. An diesem Tag werden Kumuluswolken mit einer Höhe von 1000 bis 2000 m beobachtet. Die ermittelten Wolkenhöhen des 4-Kamera-Systems stimmen bis auf eine konstante Abweichung gut mit den Ceilometer-Messungen überein: Für diesen Tag beträgt der RMSE 277 m, der MAE 213 m und der BIAS 166 m. Die Ergebnisse der Höhenbestimmung hängen stark von der Bewölkungssituation ab. In Abbildung 5.11 sind die Ergebnisse für den 01.10.2015 dargestellt. Die Mehrzahl der Messungen weichen deutlich von den Ceilometer-Messungen ab. Der RMSE beträgt 1914 m, der MAE 1849 m und der BIAS 1847 m. Der Grund für diese Abweichung ist, dass an diesem Tag überwiegend große zusammenhängende Wolkenobjekte beobachtet werden. Viele dieser Wolken überschreiten in ihren Dimensionen den betrachteten Modellierungsraum, wodurch ihre Höhe mit dem derzeitig implementierten Algorithmus nicht korrekt ermittelt wird. Zur Lösung dieser Problematik wird in zukünftigen Arbeiten das bestehende Nowcasting-Programm entsprechend erweitert.

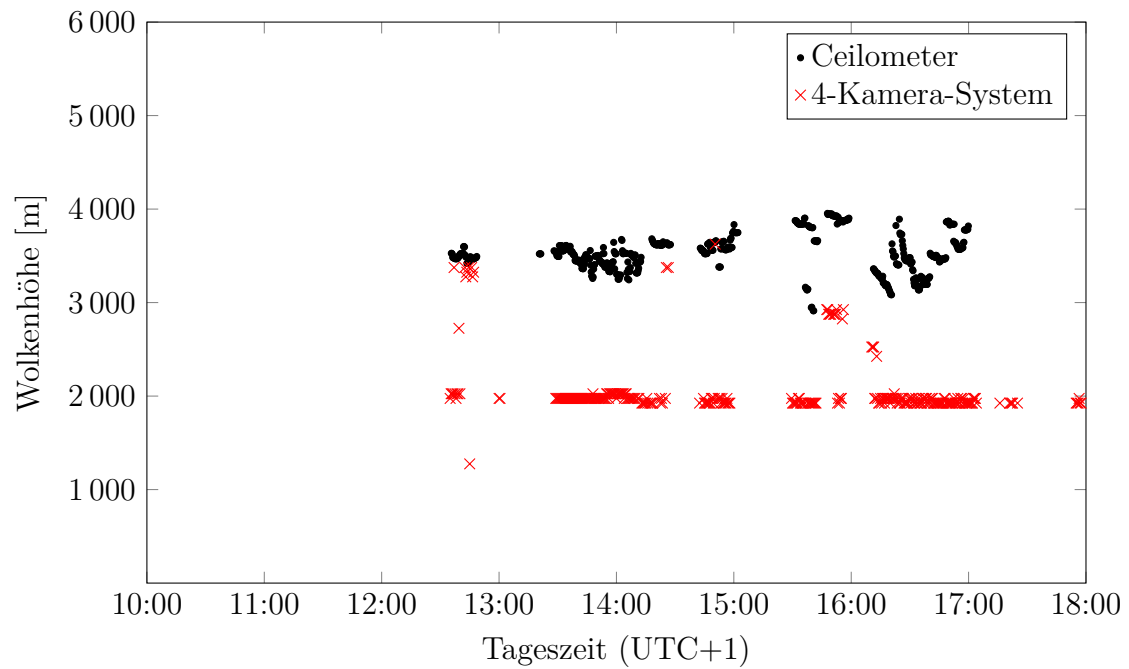


Abbildung 5.11: Dargestellt sind die Ergebnisse der Wolkenhöhenbestimmung des 4-Kamera-Systems für den 01.10.2015. Die Höhenmessungen des 4-Kamera-Systems weichen stark von den Ceilometer-Messungen ab: Für diesen Tag beträgt der RMSE 1914 m, der MAE 1849 m und der BIAS 1847 m. Der Grund für diese großen Abweichungen ist, dass an diesem Tag überwiegend große zusammenhängende Wolkenobjekte beobachtet werden, welche in ihren Dimensionen den Modellierungsraum überschreiten und ihre Höhe daher nicht korrekt ermittelt wird.

6 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wird ein innovatives System zur Wolkenhöhenbestimmung untersucht, welches aus einer Wolkenkamera und einem *Cloud Shadow Speed Sensor* (CSS) besteht (*CSS-Kamera-System*). Mit Hilfe des CSS werden die Geschwindigkeiten und Zugrichtungen vorüberziehender Wolken bestimmt. Er wird als zentrale Systemkomponente in dieser Arbeit gesondert untersucht und es werden softwarebasierte Verbesserungsmöglichkeiten erarbeitet: Es wird ein Algorithmus zur Identifizierung und Charakterisierung von Wolkenverschattungen auf Basis der vom CSS aufgenommenen Einstrahlungssignale entwickelt. Die Verschattungen werden anhand des von ihnen induzierten Abfalls der Einstrahlungsleistung und ihrer zeitlichen Dauer 12 charakteristischen Verschattungsklassen zugeordnet. Zur Erhöhung der Messfrequenz des CSS wird der interne Berechnungsalgorithmus zur Bestimmung von Bewegungsvektoren optimiert. Der neue Algorithmus verdreifacht die Anzahl der durchgeführten Messungen bei einer gleichbleibenden Messgenauigkeit.

Das CSS-Kamera-System zur Wolkenhöhenbestimmung wird für 70 Tage mit unterschiedlichen Bewölkungssituationen auf der Plataforma Solar de Almería getestet. Zur Validierung der gemessenen Wolkenhöhen kommt ein Ceilometer zum Einsatz. Die Messgenauigkeit der Höhenbestimmung hängt stark von den meteorologischen Bedingungen ab. Starken Einfluss haben insbesondere die Art der Wolken, die Wolkenhöhe und die Existenz mehrerer übereinander angeordneter Wolkenschichten. Für Wolken mit einer Höhe von bis zu 5000 m wird ein RMSE von 1280 m, ein MAE von 695 m und ein BIAS von 261 m erzielt. Wolken mit scharfer Berandung, wie beispielsweise Kumuluswolken, begünstigen die Messung, da derartige Wolken große Gradienten im Einstrahlungssignal induzieren und dadurch eine präzise Geschwindigkeitsmessung durch den CSS ermöglichen. Scharf berandete Wolken mit geringer Transmissivität begünstigen zudem die Segmentierung und Bewegungserfassung der Wolkenobjekte in den Kamerabildern. Wolken oberhalb von 5000 m weisen meist keine scharfe Berandung auf. Ihre Geschwindigkeit wird vom CSS systematisch unterschätzt, woraus eine zu geringe Wolkenhöhe resultiert. Es wird die Abhängigkeit der Messfehler von der Wolkenart mit Hilfe der eingeführten 12 Verschattungsklassen untersucht. Für Zeiträume, in denen vor allem kurze Verschattungen mit einer Dauer von weniger als 60 Sekunden und Leistungsabfällen von über 60 % beobachtet werden, sind die Fehler der Höhenmessung am geringsten. Der RMSE beträgt für diese Verschattungsklasse 1174 m, der MAE 582 m und der BIAS 332 m. Derartige Bewölkungssituationen mit kurzen, starken Einstrahlungsfluktuationen sind für Nowcasting-Systeme besonders relevant. Das CSS-Kamera-System offenbart

Schwächen bei zeitlich unbeständigen Bewölkungssituationen und bei mehreren übereinander angeordneten Wolkenschichten. Ferner können bei durchgehend bedecktem Himmel keine Wolkenhöhen ermittelt werden.

In zukünftigen Arbeiten wird die praktische Einsatzfähigkeit des CSS-Kamera-Systems innerhalb von Nowcasting-Systemen getestet. Hierbei wird sich zeigen, inwieweit die Schwächen des Systems (Wolkenhöhen über 5000 m, Existenz mehrerer Wolkenschichten) für die Einstrahlungsvorhersage relevant sind. Neben dem Gesamtsystem weisen auch die einzelnen Komponenten vielversprechendes Entwicklungspotential auf. Besonders der CSS bewährt sich mit seiner vielfältigen Funktionalität und hohen Zuverlässigkeit als kostengünstige, robuste und vielseitig einsetzbare Messeinrichtung. Neben der Bestimmung von Wolkenbewegungsvektoren kann die vorherrschende Bewölkungssituation klassifiziert werden und Einstrahlungsprofile können über lange Zeiträume zuverlässig aufgezeichnet werden. Durch eine kostengünstige Erweiterung der Hardware ist es zudem möglich, statt der bisher nicht-zusammenhängenden Messintervalle ein kontinuierliches Einstrahlungssignal aufzuzeichnen. Dies würde nicht nur die durchschnittliche Messfrequenz verdoppeln, sondern auch neue Möglichkeiten zur Geschwindigkeitsbestimmung von Wolkenarten mit diffuser Berandung eröffnen, die mit der bisherigen Konfiguration nicht korrekt vermessen werden.

In dieser Arbeit werden neben dem CSS-Kamera-System zwei alternative Methoden zur Wolkenhöhenbestimmung untersucht und mit Hilfe eines Ceilometers validiert. Das erste System greift neben einer Wolkenkamera auf ein bereits vorhandenes Schattenkamera-System zurück, welches an Stelle des CSS die Wolkengeschwindigkeiten ermittelt. Aus DNI-Einstrahlungskarten wird dabei die Bewegung von Schatten erfasst und daraus eine Wolkengeschwindigkeit bestimmt. Ein direkter Vergleich der Geschwindigkeiten zwischen CSS und Schattenkamera-System zeigt eine mittlere quadratische Abweichung von 2,9 m/s sowie einen BIAS von 1,6 m/s. Im Gegensatz zum CSS ist das Schattenkamera-System in der Lage auch die Geschwindigkeit von optisch dünnen Wolken mit einer Höhe von über 5000 m zu erfassen. Die Höhenbestimmung mit dem Wolken-/Schattenkamera-System wird anhand von 6 Tagen getestet. Bei der Validierung mit Ceilometer-Messungen wird ein RMSE von 592 m, ein MAE von 309 m und ein BIAS von 71 m erzielt. Gegenstand zukünftiger Arbeiten wird sein, das aus 6 Kameras bestehende Schattenkamera-System durch ein erheblich einfacher gestaltetes System bestehend aus lediglich einer Schattenkamera zu ersetzen. Auf diese Weise können die Kosten sowie der Aufwand für den Betrieb des Schattenkamera-Systems erheblich verringert werden und es würde eine kostengünstige Alternative zum CSS darstellen.

Als zweites Alternativsystem wird ein bereits existierendes Nowcasting-System untersucht. Dieses ermittelt die Wolkenhöhe mit Hilfe von 4 Wolkenkameras. Im Rahmen dieser Arbeit wird für dieses System erstmalig eine Validierung mit einem Ceilometer durchgeführt. Für Tage mit kleinen Kumuluswolken stimmen die ermittelten Wolkenhöhen gut mit den Ceilometer-Messungen überein, wobei ein RMSE

von weniger als 300 m erzielt wird. An Tagen mit großen zusammenhängenden Wolken werden erhebliche Messfehler bei einem RMSE von etwa 2000 m beobachtet. Eine Verbesserung des Nowcasting-Systems wird Gegenstand zukünftiger Arbeiten sein.

A Anhang

A.1 Methodenübersicht zur Bewegungsvektorbestimmung

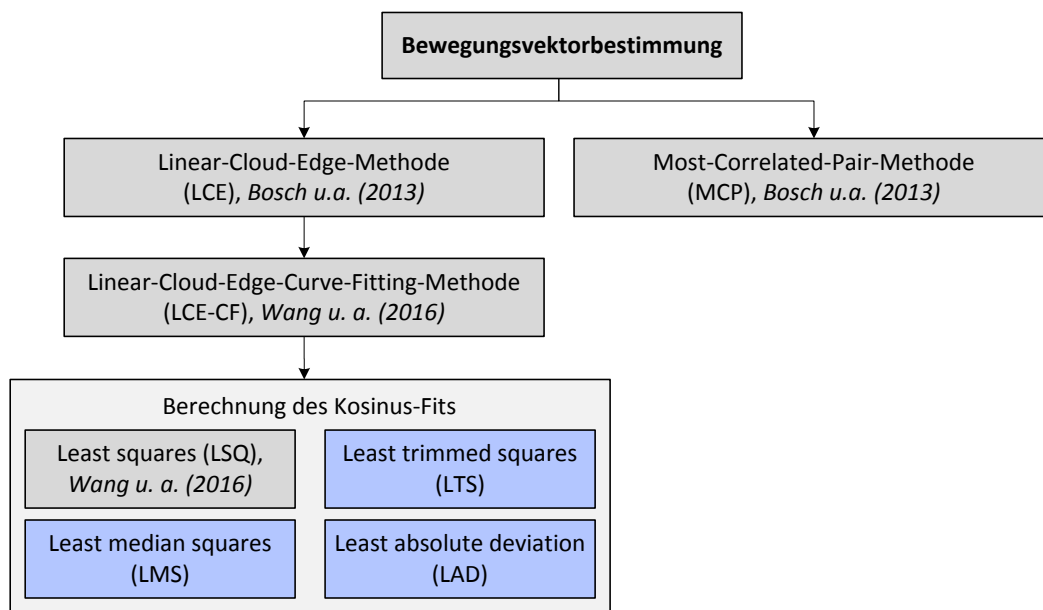


Abbildung A.1: Dargestellt ist eine hierarchische Übersicht über Methoden zur Bewegungsvektorbestimmung. Die in blau hinterlegten Methoden werden in dieser Arbeit als Alternativmethoden zur derzeit im CSS implementierten LSQ-Methode vorgestellt und in Kapitel 3.2 ausführlich untersucht. Die LTS-Methode zeigt die besten Ergebnisse in Bezug auf Anzahl und Präzision der Messungen.

A.2 Vergleich der Methoden zur Bewegungsvektorbestimmung

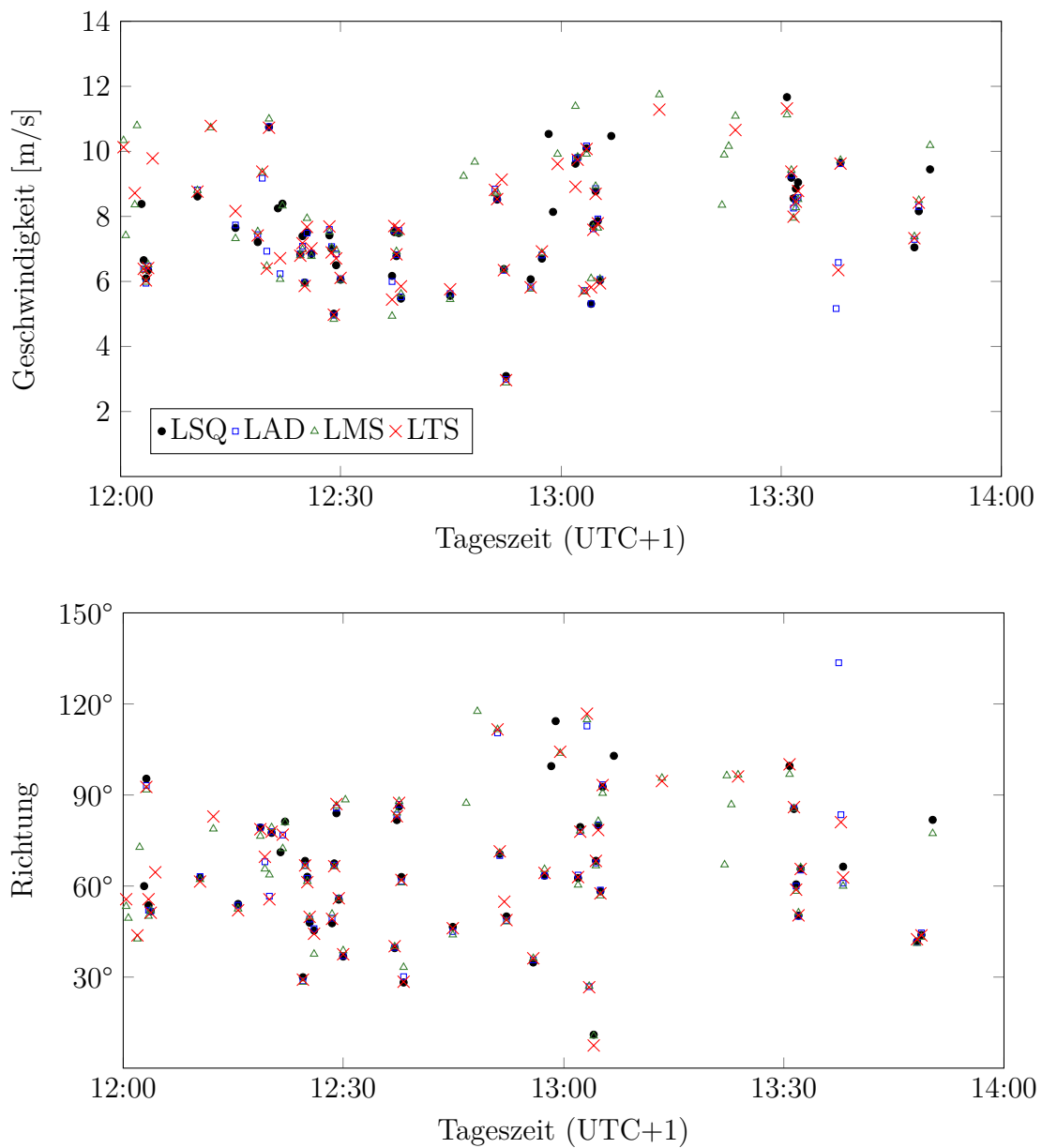


Abbildung A.2: Dargestellt sind die Geschwindigkeiten und Bewegungsrichtungen für die vier untersuchten Methoden LSQ, LAD, LTS und LMS. Dargestellt ist der Zeitraum von 11:00 bis 13:00 Uhr am 21.08.2016.

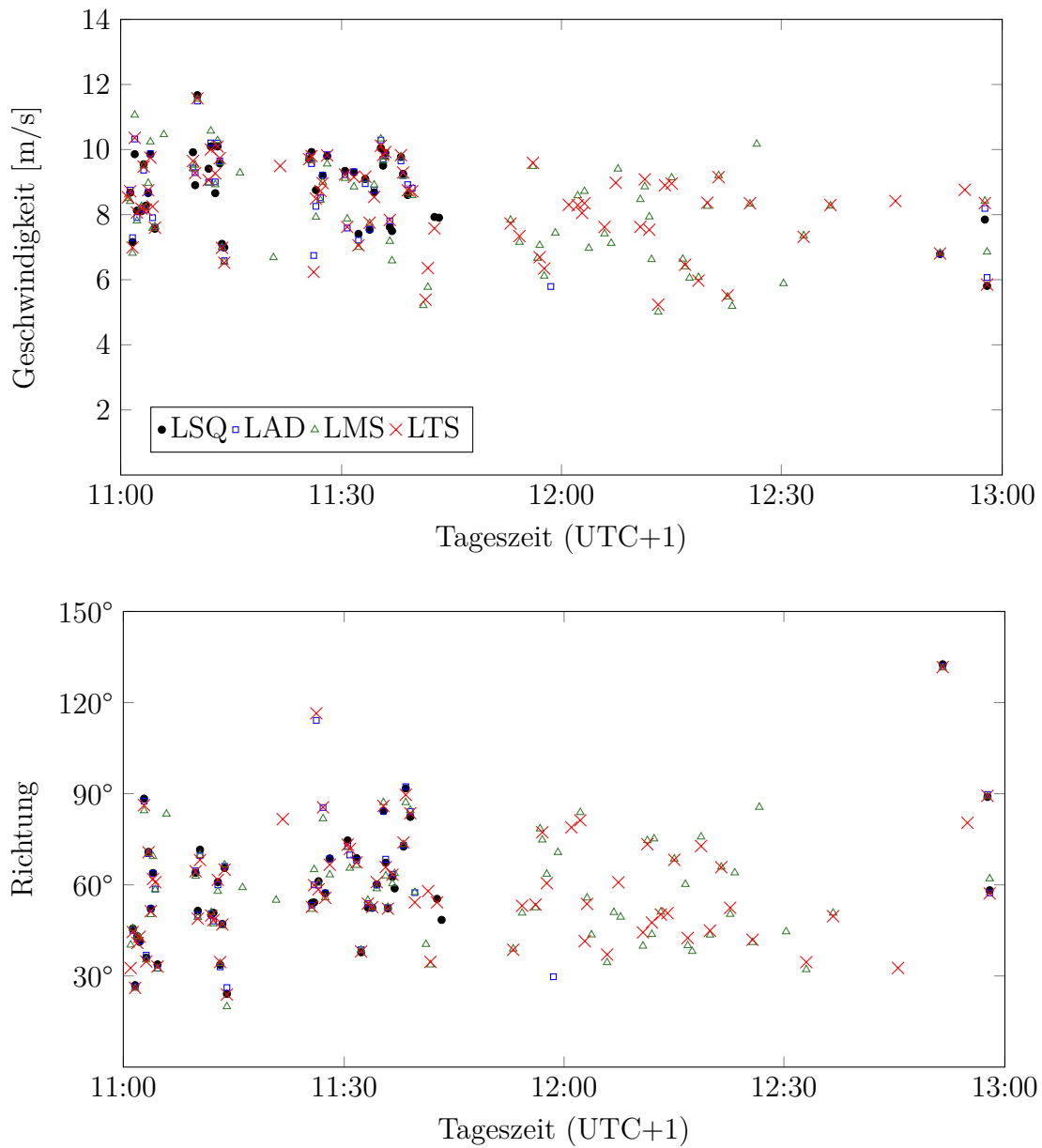


Abbildung A.3: Dargestellt sind die Geschwindigkeiten und Bewegungsrichtungen für die vier untersuchten Methoden LSQ, LAD, LTS und LMS. Dargestellt ist der Zeitraum von 12:00 bis 14:00 Uhr am 01.09.2016. Zwischen 12:00 und 12:30 Uhr werden von der LMS- und LTS-Methode eine Vielzahl von Bewegungsvektoren bestimmt, während die LSQ-Methode keine Bewegungsvektoren ermittelt.

A.3 Streudichte-Diagramme für Verschattungsklassen

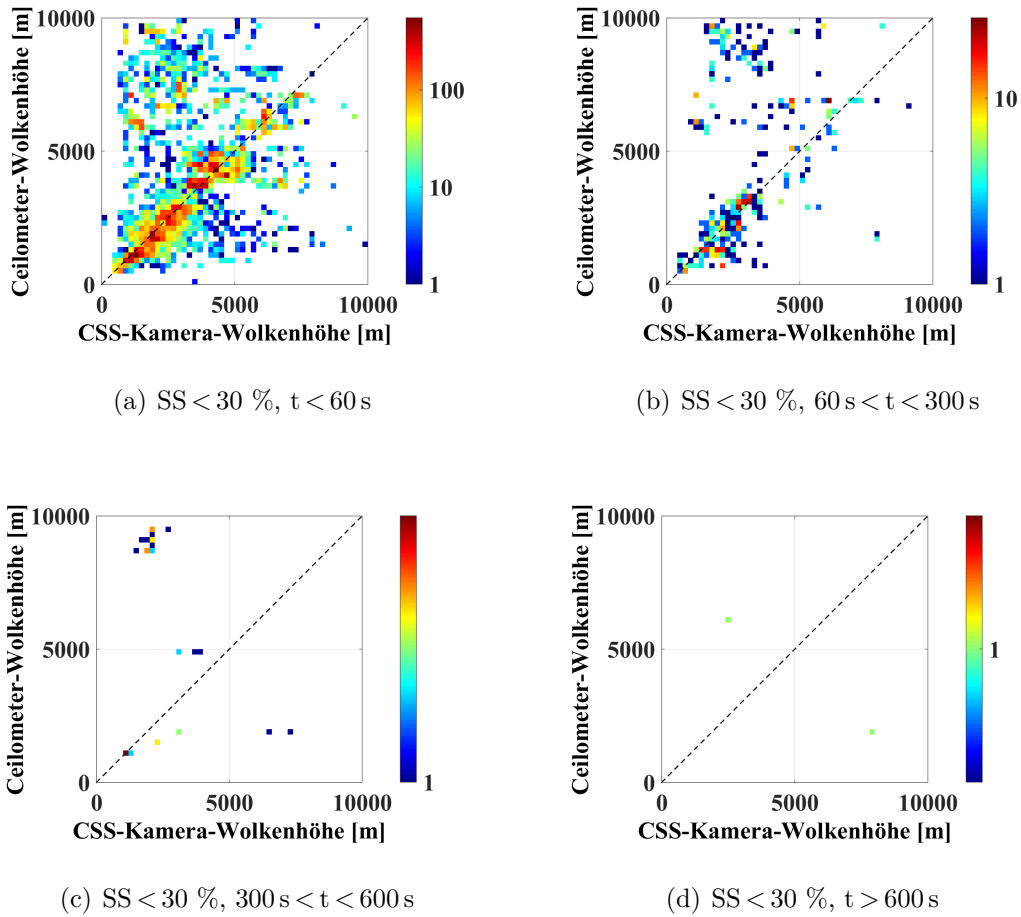


Abbildung A.4: Dargestellt sind die Streudichte-Diagramme für 4 der 12 Verschattungsklassen mit einer Schattenstärke (SS) von unter 30 % und unterschiedlichen Verschattungsdauern (t). Die einzelnen Wertepaare sind in Klassen mit einer Breite von je 200 m subsumiert. Die Farbskalierung bezieht sich auf die absolute Anzahl an Messungen pro Klasse.

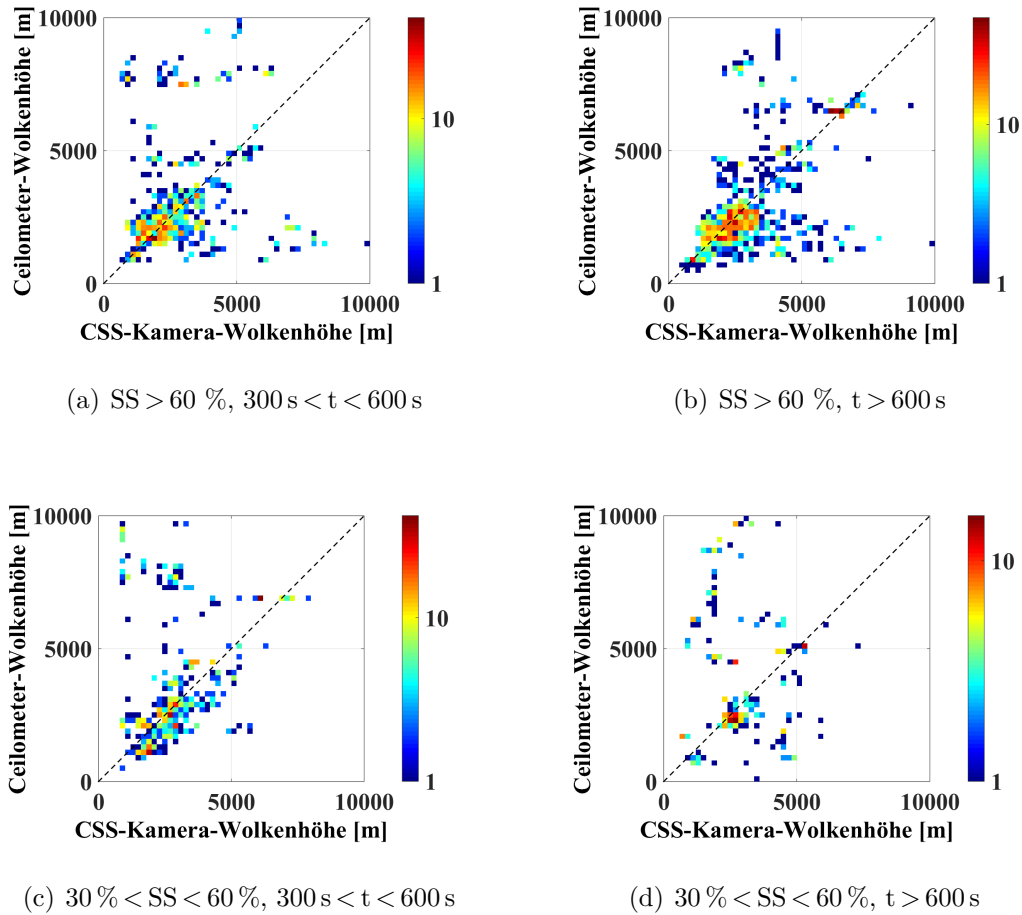


Abbildung A.5: Dargestellt sind die Streudichte-Diagramme für 4 der 12 Verschattungsklassen mit unterschiedlichen Schattenstärken (SS) und Verschattungsdauern (t). Die einzelnen Wertepaare sind in Klassen mit einer Breite von je 200 m subsumiert. Die Farbskalierung bezieht sich auf die absolute Anzahl an Messungen pro Klasse.

A.4 Wolkenklassifizierung

In der Literatur werden verschiedene Ansätze zur Klassifizierung von Wolken vorgestellt. Eine weit verbreitete Methodik findet sich im *Internationalen Wolkenatlas* (engl. *International Cloud Atlas*, WMO (1956)) der Weltorganisation für Meteorologie (WMO). Hierbei wird zwischen Wolkengattungen, -arten und -unterarten unterschieden. Zusätzlich werden Sonderformen und Begleitwolken ausgewiesen. Insgesamt existieren 10 Wolkengattungen, die sich gegenseitig ausschließen. In Tabelle A.1 sind die Gattungen mit ihren jeweiligen Arten aufgeführt. Die Arten geben den inneren Aufbau und die Gestalt wieder, die Unterarten beschreiben die unterschiedlichen Anordnungen der Wolkenteile und ihre Transmissivität. Es werden außerdem drei sich teilweise überschneidende Höhenbereiche (sogenannte *Stockwerke*) unterschieden. Ihre Definition unterscheidet sich je nach Region (Polargebiete, gemäßigte Zonen und tropische Zonen). In der gemäßigten Zone wird eine Höhe von bis zu 2 km dem unteren Stockwerk zugeordnet. Für diese Höhe sind die Gattungen Stratocumulus und Stratus typisch. Der Bereich zwischen 2 und 7 km beschreibt das mittlere Stockwerk und umfasst typischerweise die Gattung Altopumulus. Höhen zwischen 5 bis 13 km sind dem oberen Stockwerk zugeordnet, welches die Gattungen Cirrus, Cirrosumulus und Cirrostratus umfasst. Die nicht genannten Wolkengattungen können sich über mehrere Höhenbereiche erstrecken (Wetterdienst (1990), Houze Jr (2014)).

Tabelle A.1: Wolkenklassifizierung nach der WMO

Gattungen	Arten	Unterarten	Sonderformen und Begleitwolken
Cirrus	fibratus	intortus	mamma
	uncinus	radiatus	
	spissatus	vertebratus	
	castellanus	duplicatus	
	floccus		
Cirrosumulus	stratiformis	undulatus	virga mamma
	lenticularis	lacunosus	
	castellanus		
	floccus		
Cirrostratus	fibratus	duplicatus	—
	nebulosus	undulatus	
Altopumulus	stratiformis	translucidus	virga mamma
	lenticularis	perlucidus	

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Tabelle A.1: Wolkenklassifizierung nach der WMO

Gattungen	Arten	Unterarten	Sonderformen und Begleitwolken
	castellanus floccus	opacus duplicatus undulatus radiatus lacunosus	
Altostratus	—	translucidus opacus duplicatus undulatus radiatus	virga praecipitatio pannus mamma
Nimbostratus	—	—	praecipitatio virga pannus
Stratocumulus	stratiformis lenticularis castellanus	translucidus perlucidus opacus duplicatus undulatus radiatus lacunosus	mamma virga praecipitatio
Stratus	nebulosus fractus	opacus translucidus undulatus	praecipitatio
Cumulus	humilis mediocris congestus fractus	radiatus	pileus velum virga praecipitatio arcus pannus tuba
Cumulonimbus	calvus capillatus	—	praecipitatio virga pannus incus

Fortsetzung auf der nächsten Seite

Tabelle A.1: Wolkenklassifizierung nach der WMO

Gattungen	Arten	Unterarten	Sonderformen und Begleitwolken
			mamma pileus velum arcus tuba

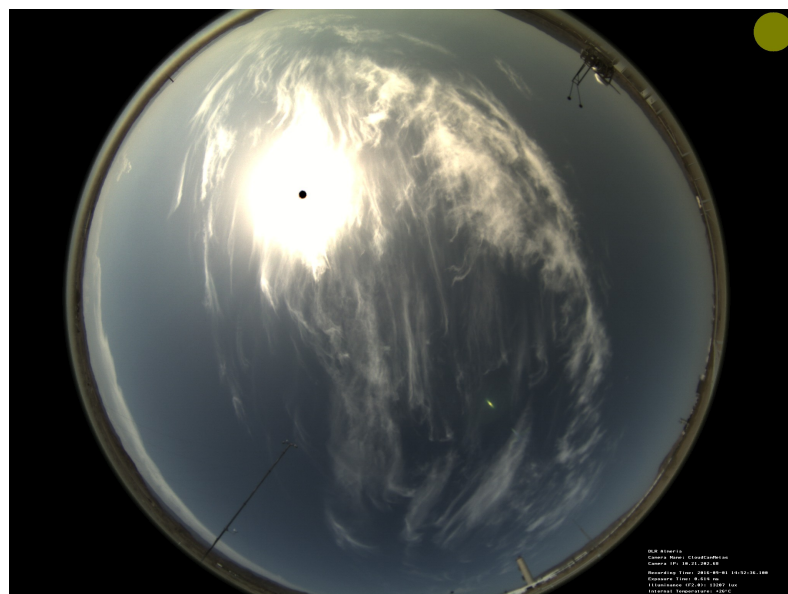


Abbildung A.6: Am 01.09.2016 werden zwischen 14:00 und 15:00 Uhr Cirrus-Wolken auf einer Höhe von 8000 bis 9000 m über der PSA beobachtet. Sie erscheinen typischerweise als leuchtend weiße, dünne Fäden.

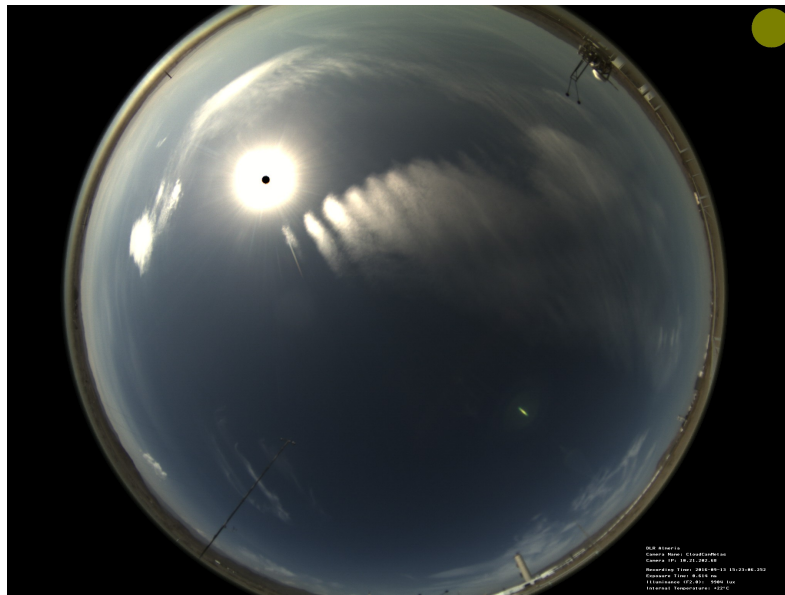


Abbildung A.7: Dieses Wolkenkamerabild zeigt Cirrostratus-Wolken am 13.09.2016 um 15:23 Uhr über der PSA. Ihre Höhe beträgt etwa 7000 bis 8000 m.

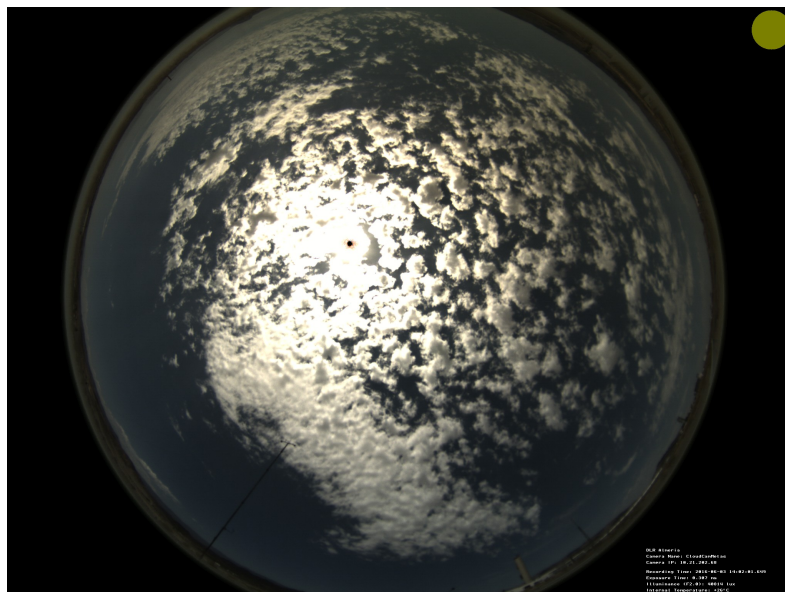


Abbildung A.8: Am 03.06.2016 um 14:00 Uhr werden Altocumulus-Wolken auf einer Höhe von 4000 m beobachtet. Diese Wolkengattung erscheint als weiße oder graue schuppenartige Ballen.

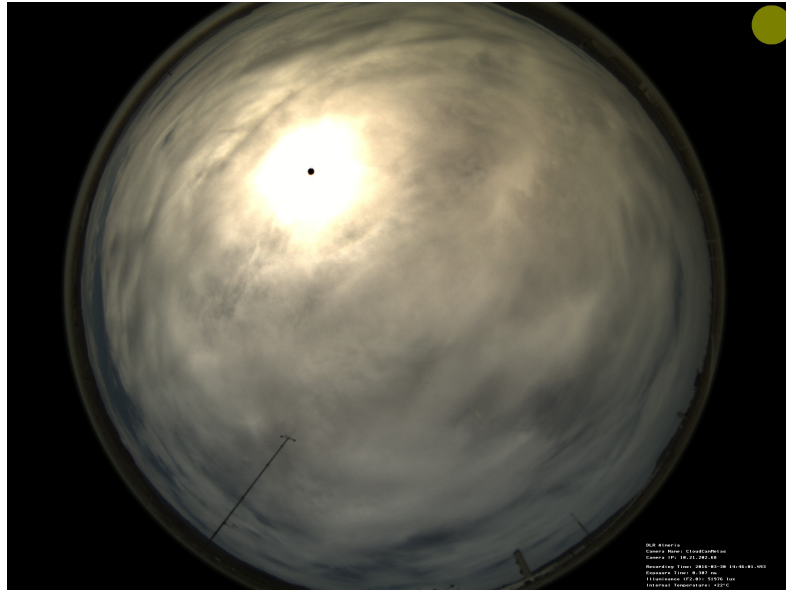


Abbildung A.9: Dieses Wolkenkamerabild vom 30.03.2016 um 14:46 Uhr zeigt Altostratus-Wolken auf einer Höhe von 6000 bis 7000 m. Altostratus-Wolken sind bläuliche bis graue Schichtwolken, welche keine Konturen aufweisen. Die Sonne leuchtet noch schwach hindurch.

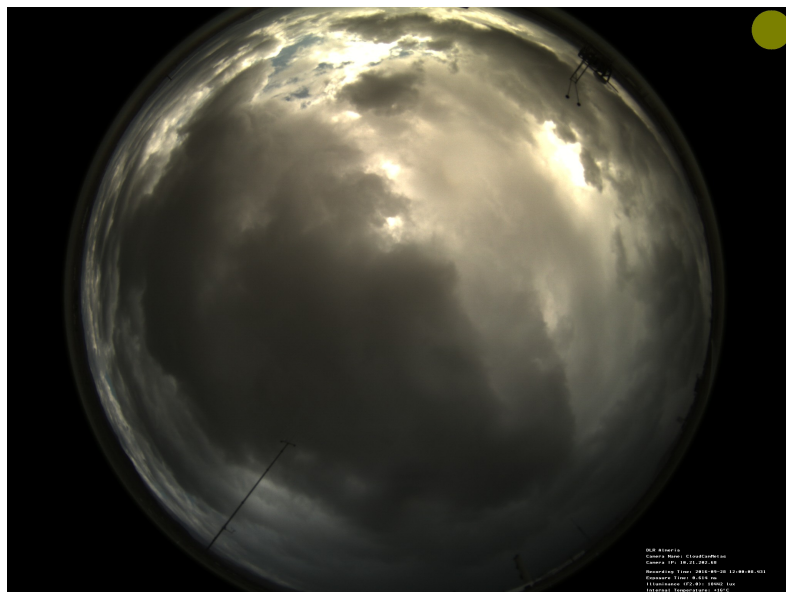


Abbildung A.10: Nimbostratus-Wolken werden am 28.09.2016 um 12:00 Uhr über der PSA beobachtet. Diese Wolkengattung wird gemeinsprachlich als *Regenwolke* bezeichnet und erscheint als konturlose, graue Wolkenschicht mittlerer Höhe. Mit ihr gehen oftmals langanhaltende Niederschläge einher.

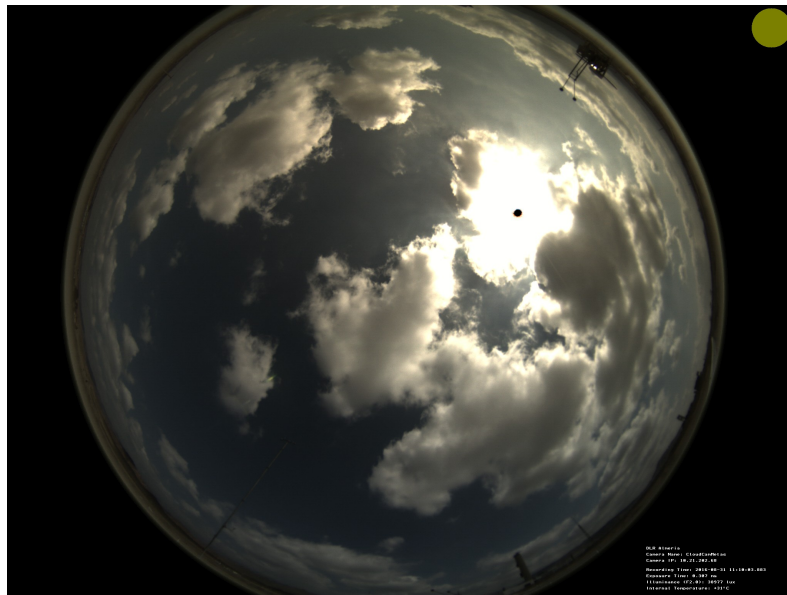


Abbildung A.11: Dieses Wolkenkamerabild vom 31.08.2016 zeigt Kumuluswolken auf einer Höhe von 1000 m. Diese Wolkengattung weist typischerweise eine flache Unterseite und eine bauschige Oberseite auf.

Literaturverzeichnis

- [Allmen u. Kegelmeyer Jr 1996] ALLMEN, Mark C.; KEGELMEYER JR, W P.: The Computation of Cloud-Base Height from Paired Whole-Sky Imaging Cameras. In: *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 13 (1996), Nr. 1, 97–113. [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0426\(1996\)013<0097:TCOCBH>2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0426(1996)013<0097:TCOCBH>2.0.CO;2)
- [von Appen u. a. 2013] APPEN, Jan von; BRAUN, Martin; STETZ, Thomas; DIWOLD, Konrad ; GEIBEL, Dominik: Time in the Sun: The Challenge of High PV Penetration in the German Electric Grid. In: *IEEE power and energy magazine* 11 (2013), Nr. 2, 55–64. <http://dx.doi.org/10.1109/MPE.2012.2234407>. – DOI 10.1109/MPE.2012.2234407
- [Bachmann 2010] BACHMANN, Alexander: *Dichte Objektsegmentierung in Stereobildfolgen*. Bd. 15. KIT Scientific Publishing, 2010
- [Baldwin u. Collins 2015] BALDWIN, Robert R.; COLLINS, Kevin: *Cloud tracking*. 2015. – US Patent 9,184,311
- [Beekmans u. a. 2016] BEEKMANS, Christoph; SCHNEIDER, Johannes; LÄBE, Thomas; LENNEFER, Martin; STACHNISS, Cyrill ; SIMMER, Clemens: Cloud photogrammetry with dense stereo for fisheye cameras. In: *Atmospheric Chemistry and Physics* 16 (2016), Nr. 22, 14231–14248. <http://dx.doi.org/10.5194/acp-16-14231-2016>. – DOI 10.5194/acp-16-14231-2016
- [Belin 1948] BELIN, RE: A Radiosonde Method for Atmospheric Potential Gradient Measurements. In: *Proceedings of the Physical Society* 60 (1948), Nr. 4, S. 381
- [Blanc u. a. 2016] BLANC, Philippe; MASSIP, Pierre; KAZANTZIDIS, Andreas; TZOUMANIKAS, Panagiotis; KUHN, Pascal; WILBERT, Stefan; SCHÜLER, David ; PRAHL, Christoph: Short-Term Forecasting of High Resolution Local DNI Maps with Multiple Fish-Eye Cameras in Stereoscopic Mode. In: *accepted for AIP Conference Proceedings* (2016)
- [Bloomfield u. Steiger 2012] BLOOMFIELD, Peter; STEIGER, William: *Least absolute deviations: Theory, applications and algorithms*. Bd. 6. Springer Science & Business Media, 2012
- [Bosch u. a. 2013] BOSCH, Juan L.; ZHENG, Yuehai ; KLEISSL, Jan: Deriving cloud velocity from an array of solar radiation measurements. In: *Solar Energy* 87 (2013), 196–203. <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2012.10.020>. – DOI 10.1016/j.solener.2012.10.020

- [Bosch u. Kleissl 2013] BOSCH, Juan L.; KLEISSL, Jan: Cloud motion vectors from a network of ground sensors in a solar power plant. In: *Solar Energy* 95 (2013), 13–20. <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2013.05.027>. – DOI 10.1016/j.solener.2013.05.027
- [Carnuth u. Reiter 1986] CARNUTH, Walter; REITER, Reinhold: Cloud extinction profile measurements by lidar using Klett’s inversion method. In: *Applied optics* 25 (1986), Nr. 17, 2899–2907. <http://dx.doi.org/10.1364/AO.25.002899>. – DOI 10.1364/AO.25.002899
- [Chai u. Draxler 2014] CHAI, Tianfeng; DRAXLER, Roland R.: Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE)?–Arguments against avoiding RMSE in the literature. In: *Geoscientific Model Development* 7 (2014), Nr. 3, 1247–1250. <http://dx.doi.org/10.5194/gmdd-7-1525-2014>. – DOI 10.5194/gmdd-7-1525-2014
- [Chow u. a. 2015] CHOW, Chi W.; BELONGIE, Serge ; KLEISSL, Jan: Cloud motion and stability estimation for intra-hour solar forecasting. In: *Solar Energy* 115 (2015), 645–655. <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2015.03.030>. – DOI 10.1016/j.solener.2015.03.030
- [Chow u. a. 2011] CHOW, Chi W.; URQUHART, Bryan; LAVE, Matthew; DOMINGUEZ, Anthony; KLEISSL, Jan; SHIELDS, Janet ; WASHOM, Byron: Intra-hour forecasting with a total sky imager at the UC San Diego solar energy testbed. In: *Solar Energy* 85 (2011), Nr. 11, 2881–2893. <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2011.08.025>. – DOI 10.1016/j.solener.2011.08.025
- [Chu u. a. 2014] CHU, Yinghao; PEDRO, Hugo T.; NONNENMACHER, Lukas; INMAN, Rich H.; LIAO, Zhouyi ; COIMBRA, Carlos F.: A Smart Image-Based Cloud Detection System for Intrahour Solar Irradiance Forecasts. In: *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 31 (2014), Nr. 9, 1995–2007. <http://dx.doi.org/10.1175/JTECH-D-13-00209.1>. – DOI 10.1175/JTECH-D-13-00209.1
- [Čížek 2006] ČÍŽEK, Pavel: Least trimmed squares in nonlinear regression under dependence. In: *Journal of Statistical Planning and Inference* 136 (2006), Nr. 11, 3967–3988. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jspi.2005.05.004>. – DOI 10.1016/j.jspi.2005.05.004
- [Clothiaux u. a. 2000] CLOTHIAUX, Eugene E.; ACKERMAN, Thomas P.; MACE, Gerald G.; MORAN, Kenneth P.; MARCHAND, Roger T.; MILLER, Mark A. ; MARTNER, Brooks E.: Objective Determination of Cloud Heights and Radar Reflectivities Using a Combination of Active Remote Sensors at the ARM CART sites. In: *Journal of Applied Meteorology* 39 (2000), Nr. 5, 645–665. [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0450\(2000\)039<0645:ODOCHA>2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0450(2000)039<0645:ODOCHA>2.0.CO;2)
- [Comstock u. a. 2002] COMSTOCK, Jennifer M.; ACKERMAN, Thomas P. ; MACE, Gerald G.: Ground-based lidar and radar remote sensing of tropical cirrus clouds at Nauru Island: Cloud statistics and radiative impacts. In: *Journal of*

- Geophysical Research: Atmospheres* 107 (2002), Nr. D23. <http://dx.doi.org/10.1029/2002JD002203>. – DOI 10.1029/2002JD002203
- [Dessler u. a. 2006] DESSLER, AE; PALM, SP ; SPINHIRNE, JD: Tropical cloud-top height distributions revealed by the Ice, Cloud, and Land Elevation Satellite (ICE-Sat)/Geoscience Laser Altimeter System (GLAS). In: *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 111 (2006), Nr. D12. <http://dx.doi.org/10.1029/2005JD006705>. – DOI 10.1029/2005JD006705
- [Devore 2015] DEVORE, Jay L.: *Probability and Statistics for Engineering and the Sciences*. Cengage Learning, 2015
- [DuBois u. a. 2002] DUBOIS, John L.; MÜLTHAUF, Robert P. ; ZIEGLER, Charles A.: *The Invention and Development of the Radiosonde: with a Catalog of Upper-Atmospheric Telemetry Probes in the National Museum of American History, Smithsonian Institution*. Bd. 53. Smithsonian Institution Press, 2002
- [Feldhoff 2015] FELDHOFF, Jan F.: *Analysis of Once-Through Boiler Concepts in Parabolic Troughs*, RWTH Aachen, Diss., 2015
- [Fung u. a. 2013] FUNG, Victor; BOSCH, Juan L.; ROBERTS, Steve W. ; KLEISSL, Jan: Cloud shadow speed sensor. In: *Atmospheric Measurement Techniques* 6 (2013), Nr. 5. <http://dx.doi.org/10.5194/amt-7-1693-2014>. – DOI 10.5194/amt-7-1693-2014
- [Gaumet u. a. 1998] GAUMET, JL; HEINRICH, JC; CLUZEAU, M; PIERRARD, P ; PRIEUR, J: Cloud-Base Height Measurements with a Single-Pulse Erbium-Glass Laser Ceilometer. In: *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 15 (1998), Nr. 1, 37–45. [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0426\(1998\)015<0037:CBHMTWA>2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0426(1998)015<0037:CBHMTWA>2.0.CO;2). – DOI 10.1175/1520-0426(1998)015<0037:CBHMTWA>2.0.CO;2
- [Giloni u. Padberg 2002] GILONI, A; PADBERG, M: Least Trimmed Squares Regression, Least Median Squares Regression, and Mathematical Programming. In: *Mathematical and Computer Modelling* 35 (2002), Nr. 9, 1043–1060. [http://dx.doi.org/10.1016/S0895-7177\(02\)00069-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0895-7177(02)00069-9). – DOI 10.1016/S0895-7177(02)00069-9
- [Hamill u. Nehr Korn 1993] HAMILL, Thomas M.; NEHRKORN, Thomas: A Short-Term Cloud Forecast Scheme Using Cross Correlations. In: *Weather and Forecasting* 8 (1993), Nr. 4, 401–411. [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0434\(1993\)008<0401%3AASTCFS>2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0434(1993)008<0401%3AASTCFS>2.0.CO;2). – DOI 10.1175/1520-0434(1993)008<0401
- [Hammer u. Stolzenburg 1993] HAMMER, A; STOLZENBURG, K: *Analyse kurzfristiger Fluktuationen der Solarstrahlung unter Berücksichtigung von Wolkenfeldstrukturen*, Diploma thesis. Carl von Ossietzky University of Oldenburg. Oldenburg, Germany, Diss., 1993. https://www.uni-oldenburg.de/fileadmin/user_upload/physik/ag/ehf/enmet/download/diplom_Stolzenburg_Hammer_1993.pdf

- [Hammer u. a. 1999] HAMMER, Annette; HEINEMANN, Detlev; LORENZ, Elke ; LÜCKEHE, Bertram: Short-term forecasting of solar radiation: a statistical approach using satellite data. In: *Solar Energy* 67 (1999), Nr. 1, 139–150. [http://dx.doi.org/10.1016/S0038-092X\(00\)00038-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0038-092X(00)00038-4). – DOI 10.1016/S0038-092X(00)00038-4
- [Hanrieder u. a. 2016] HANRIEDER, Natalie; SENGUPTA, Manajit; XIE, Yu; WILBERT, Stefan ; PITZ-PAAL, Robert: Modeling beam attenuation in solar tower plants using common DNI measurements. In: *Solar Energy* 129 (2016), 244–255. http://elib.dlr.de/97912/1/ICEM2015_BeamAttenuation_DNImeas_Hanrieder.pdf
- [Heese u. a. 2010] HEESE, B; FLENTJE, H; ALTHAUSEN, D; ANSMANN, A ; FREY, S: Ceilometer lidar comparison: backscatter coefficient retrieval and signal-to-noise ratio determination. In: *Atmospheric Measurement Techniques* 3 (2010), Nr. 6, 1763–1770. <http://dx.doi.org/10.5194/amt-3-1763-2010>. – DOI 10.5194/amt-3-1763-2010
- [Heinemann u. a. 2006] HEINEMANN, Detlev; LORENZ, Elke ; GIRODO, Marco: Forecasting of Solar Radiation. In: *Solar energy resource management for electricity generation from local level to global scale*. Nova Science Publishers, New York (2006). https://www.researchgate.net/publication/228827998_Forecasting_of_solar_radiation
- [Heinle u. a. 2010] HEINLE, Anna; MACKE, Andreas ; SRIVASTAV, Anand: Automatic cloud classification of whole sky images. In: *Atmospheric Measurement Techniques* 3 (2010), Nr. 3, 557. <http://dx.doi.org/10.5194/amt-3-557-2010>. – DOI 10.5194/amt-3-557-2010
- [Heinrichs u. a. 2007] HEINRICHS, Matthias; RODEHORST, Volker ; HELLWICH, Olaf: Efficient semi-global matching for trinocular stereo. In: *differences (SSD)* 2 (2007), Nr. 1, 1. https://www.researchgate.net/publication/228545735_Efficient_Semi-Global_Matching_for_Trinocular_Stereo
- [Hinkelman u. a. 2011] HINKELMAN, L; GEORGE, R; WILCOX, S ; SENGUPTA, M: Spatial and temporal variability of incoming solar irradiance at a measurement site in Hawai'i. In: *91st American Meteorological Society Annual Meeting*, 2011, S. 23–27
- [Horn u. Schunck 1981] HORN, Berthold K.; SCHUNCK, Brian G.: Determining Optical Flow. In: *Artificial intelligence* 17 (1981), Nr. 1-3, 185–203. [http://dx.doi.org/10.1016/0004-3702\(81\)90024-2](http://dx.doi.org/10.1016/0004-3702(81)90024-2). – DOI 10.1016/0004-3702(81)90024-2
- [Houze Jr 2014] HOUZE JR, Robert A.: *Cloud dynamics*. Bd. 104. Academic press, 2014
- [Huang u. a. 2011] HUANG, H; YOO, S; YU, D; HUANG, D ; QIN, H: Cloud motion detection for short term solar power prediction. In: *ICML 2011 Workshop on Machine Learning for Global Challenges*, 2011

- [Huang u. a. 2013] HUANG, Hao; XU, Jin; PENG, Zhenzhou; YOO, Shinjae; YU, Dantong; HUANG, Dong ; QIN, Hong: Cloud Motion Estimation for Short Term Solar Irradiation Prediction. In: *Smart Grid Communications (SmartGridComm), 2013 IEEE International Conference on* IEEE, 2013, 696–701
- [Huang u. a. 2012] HUANG, Hao; YOO, Shinjae; YU, Dantong; HUANG, Dong ; QIN, Hong: Correlation and Local Feature Based Cloud Motion Estimation. In: *Proceedings of the Twelfth International Workshop on Multimedia Data Mining* ACM, 2012, S. 1–9
- [Huber 2009] HUBER, Peter J.: *Robust Statistics*. Springer, 2009. – ISBN 978–0–470–12990–6
- [Ineichen u. Perez 2002] INEICHEN, Pierre; PEREZ, Richard: A new air mass independent formulation for the Linke turbidity coefficient. In: *Solar Energy* 73 (2002), Nr. 3, 151–157. [http://dx.doi.org/10.1016/S0038-092X\(02\)00045-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0038-092X(02)00045-2). – DOI 10.1016/S0038-092X(02)00045-2
- [Jensen u. a. 2016] JENSEN, Michael P.; HOLDRIDGE, Donna J. ; JOHNSON, Karen L.: Comparison of Vaisala radiosondes RS41 and RS92 at the ARM Southern Great Plains site. In: *Atmospheric Measurement Techniques* 9 (2016), Nr. 7, 3115. <http://dx.doi.org/10.5194/amt-9-3115-2016>. – DOI 10.5194/amt-9-3115-2016
- [Jensenius u. Cotton 1981] JENSENIUS, JS; COTTON, GF: The development and testing of automated solar energy forecasts based on the model output statistics (MOS) technique. In: *Proceedings of the 1st Workshop on Terrestrial Solar Resource Forecasting and on the Use on Satellites for Terrestrial Solar Resource Assessment, Washington, DC, USA*, 1981, S. 2–5
- [Kassianov u. a. 2005] KASSIANOV, Evgueni; LONG, Charles N. ; CHRISTY, Jason: Cloud-Base-Height Estimation from Paired Ground-Based Hemispherical Observations. In: *Journal of Applied Meteorology* 44 (2005), Nr. 8, 1221–1233. <http://dx.doi.org/10.1175/JAM2277.1>. – DOI 10.1175/JAM2277.1
- [Killius u. a. 2015] KILLIUS, Niels; PRAHL, Christoph; HANRIEDER, Natalie; WILBERT, Stefan ; SCHROEDTER-HOMSCHEIDT, Marion: On the use of NWP for Cloud Base Height Estimation in Cloud Camera-Based Solar Irradiance Nowcasting. (2015). <http://elib.dlr.de/99173/>
- [Kleissl u. a. 2016] KLEISSL, J; URQUHART, B; GHONIMA, M; DAHLIN, E; NGUYEN, A; KURTZ, B; CHOW, CW ; MEJIA, FA: University of California, San Diego (UCSD) Sky Imager Cloud Position Study Field Campaign Report / DOE ARM Climate Research Facility, Pacific Northwest National Laboratory; Richland, Washington. Version: 2016. <https://www.arm.gov/publications/programdocs/doe-sc-arm-15-056.pdf>. 2016. – Forschungsbericht

- [Klett 1981] KLETT, James D.: Stable analytical inversion solution for processing lidar returns. In: *Applied Optics* 20 (1981), Nr. 2, 211–220. <http://dx.doi.org/10.1364/AO.20.000211>. – DOI 10.1364/AO.20.000211
- [Koppe 1896] KOPPE, Carl: *Photogrammetrie und internationale Wolkenmessung*. Vieweg, 1896
- [Kuhn u. a. 2017] KUHN, P; WILBERT, S; PRAHL, C; SCHÜLER, D; HAASE, T; HIRSCH, T; WITTMANN, M; PITZ-PAAL, R; BLANC, P; RAMIREZ, L; ZERZALEJO, L; MEYER, A ; VUILLEUMIER, L: Shadow camera system for the generation of solar irradiance maps. In: *submitted to Solar Energy* (2017)
- [Kuhn u. a. 2016a] KUHN, P; WILBERT, S; PRAHL, C; SCHÜLER, D; HAASE, T; KOZONEK, N; KILLIUS, N; HANRIEDER, N; BLANC, P ; PITZ-PAAL, R: Bewertung von Wolkenkamerabasiertem Nowcasting der Solarstrahlung, 2016. – 4. Fachtagung Energiemeteorologie, Bremerhaven, Deutschland
- [Kuhn u. a. 2016b] KUHN, P; WILBERT, S; SCHÜLER, D; PRAHL, C; HAASE, T; RAMIREZ, L; ZERZALEJO, L; MEYER, A; VUILLEUMIER, L; BLANC, P; DUBRANA, J; KAZANTZIDIS, A; SCHROEDTER-HOMSCHEIDT, M; HIRSCH, T ; PITZ-PAAL, R: Validation of Spatially Resolved All Sky Imager Derived DNI Nowcasts. In: *accepted for AIP Conference Proceedings* (2016)
- [Kutulakos u. Seitz 2000] KUTULAKOS, Kiriakos N.; SEITZ, Steven M.: A Theory of Shape by Space Carving. In: *International Journal of Computer Vision* 38 (2000), Nr. 3, 199–218. <http://dx.doi.org/http://dx.doi.org/10.1109/ICCV.1999.791235>. – DOI <http://dx.doi.org/10.1109/ICCV.1999.791235>
- [Lagarias u. a. 1998] LAGARIAS, Jeffrey C.; REEDS, James A.; WRIGHT, Margaret H. ; WRIGHT, Paul E.: Convergence properties of the Nelder–Mead simplex method in low dimensions. In: *SIAM Journal on optimization* 9 (1998), Nr. 1, 112–147. <http://dx.doi.org/10.1137/S1052623496303470>. – DOI 10.1137/S1052623496303470
- [Lappalainen u. Valkealahti 2015] LAPPALAINEN, Kari; VALKEALAHTI, Seppo: Recognition and modelling of irradiance transitions caused by moving clouds. In: *Solar Energy* 112 (2015), 55–67. https://www.researchgate.net/publication/283497374_Recognition_of_shading_events_caused_by_moving_clouds_and_determination_of_shadow_velocity_from_solar_radiation_measurements
- [Lappalainen u. Valkealahti 2016a] LAPPALAINEN, Kari; VALKEALAHTI, Seppo: Analysis of shading periods caused by moving clouds. In: *Solar Energy* 135 (2016), 188–196. <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2016.05.050>. – DOI 10.1016/j.solener.2016.05.050
- [Lappalainen u. Valkealahti 2016b] LAPPALAINEN, Kari; VALKEALAHTI, Seppo: Apparent velocity of shadow edges caused by moving clouds. In: *Solar Energy* 138 (2016), 47–52. <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2016.09.008>. – DOI 10.1016/j.solener.2016.09.008

- [Leese u. a. 1971] LEESE, John A.; NOVAK, Charles S. ; CLARK, Bruce B.: An Automated Technique for Obtaining Cloud Motion from Geosynchronous Satellite Data Using Cross Correlation. In: *Journal of applied meteorology* 10 (1971), Nr. 1, 118–132. [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0450\(1971\)010<0118:AATFOC>2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0450(1971)010<0118:AATFOC>2.0.CO;2). – DOI 10.1175/1520-0450(1971)010<0118:AATFOC>2.0.CO;2
- [Leese u. a. 1970] LEESE, John A.; NOVAK, Charles S. ; TAYLOR, V R.: The Determination of Cloud Pattern Motions From Geosynchronous Satellite Image Data. In: *Pattern Recognition* 2 (1970), Nr. 4, 279IN31281–280IN33292. [http://dx.doi.org/10.1016/0031-3203\(70\)90018-X](http://dx.doi.org/10.1016/0031-3203(70)90018-X). – DOI 10.1016/0031-3203(70)90018-X
- [Lewis 1995] LEWIS, JP: Fast Normalized Cross-Correlation. In: *Vision interface* Bd. 10, 1995, 120–123
- [Liu u. a. 2013] LIU, Lei; SUN, Xue-jin; GAO, Tai-chang ; ZHAO, Shi-jun: Comparison of Cloud Properties from Ground-Based Infrared Cloud Measurement and Visual Observations. In: *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 30 (2013), Nr. 6, 1171–1179. <http://dx.doi.org/10.1175/JTECH-D-12-00157.1>. – DOI 10.1175/JTECH-D-12-00157.1
- [Liu u. a. 2015] LIU, Lei; SUN, Xue-jin; LIU, Xi-chuan; GAO, Tai-chang ; ZHAO, Shi-jun: Comparison of Cloud Base Height Derived from a Ground-Based Infrared Cloud Measurement and Two Ceilometers. In: *Advances in Meteorology* 2015 (2015). <http://dx.doi.org/10.1175/JTECH-D-12-00157.1>. – DOI 10.1175/JTECH-D-12-00157.1
- [Long u. a. 2006] LONG, Charles N.; SABBURG, Jeff M.; CALBÓ, Josep ; PAGÈS, David: Retrieving Cloud Characteristics from Ground-Based Daytime Color All-Sky Images. In: *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 23 (2006), Nr. 5, 633–652. <http://dx.doi.org/10.1175/JTECH1875.1>. – DOI 10.1175/JTECH1875.1
- [Lucas u. a. 1981] LUCAS, Bruce D.; KANADE, Takeo u. a.: An iterative image registration technique with an application to stereo vision. (1981). https://ri.cmu.edu/pub_files/pub3/lucas_bruce_d_1981_2/lucas_bruce_d_1981_2.pdf
- [Mäki u. Valkealahti 2012] MÄKI, Anssi; VALKEALAHTI, Seppo: Power Losses in Long String and Parallel-Connected Short Strings of Series-Connected Silicon-Based Photovoltaic Modules Due to Partial Shading Conditions. In: *IEEE Transactions on Energy Conversion* 27 (2012), Nr. 1, 173–183. <http://dx.doi.org/10.1109/TEC.2011.2175928>. – DOI 10.1109/TEC.2011.2175928
- [Marquez u. a. 2013] MARQUEZ, Ricardo; GUEORGUIEV, Vesselin G. ; COIMBRA, Carlos F.: Forecasting of Global Horizontal Irradiance Using Sky Cover Indices. In: *Journal of Solar Energy Engineering* 135 (2013), Nr. 1, 011017. <http://dx.doi.org/10.1115/1.4007497>. – DOI 10.1115/1.4007497

- [Martucci u. a. 2010] MARTUCCI, Giovanni; MILROY, Conor ; O'DOWD, Colin D.: Detection of Cloud-Base Height Using Jenoptik CHM15K and Vaisala CL31 Ceilometers. In: *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 27 (2010), Nr. 2, 305–318. <http://dx.doi.org/10.1175/2009JTECHA1326.1>. – DOI 10.1175/2009JTECHA1326.1
- [Mathiesen u. Kleissl 2011] MATHIESEN, Patrick; KLEISSL, Jan: Evaluation of numerical weather prediction for intra-day solar forecasting in the continental United States. In: *Solar Energy* 85 (2011), Nr. 5, 967–977. <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2011.02.013>. – DOI 10.1016/j.solener.2011.02.013
- [Mount u. a. 2014] MOUNT, David M.; NETANYAHU, Nathan S.; PIATKO, Christine D.; SILVERMAN, Ruth ; WU, Angela Y.: On the Least Trimmed Squares Estimator. In: *Algorithmica* 69 (2014), Nr. 1, 148–183. <http://dx.doi.org/10.1007/s00453-012-9721-8>. – DOI 10.1007/s00453-012-9721-8
- [Münkel u. a. 2004] MÜNDEL, Christoph; EMEIS, Stefan; MÜLLER, Wolfgang J. ; SCHAEFER, Klaus P.: Aerosol concentration measurements with a lidar ceilometer: results of a one year measuring campaign. In: *Remote Sensing* International Society for Optics and Photonics, 2004, 486–496
- [Nguyen u. Kleissl 2014] NGUYEN, Dung A.; KLEISSL, Jan: Stereographic methods for cloud base height determination using two sky imagers. In: *Solar Energy* 107 (2014), 495–509. <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2014.05.005>. – DOI 10.1016/j.solener.2014.05.005
- [Nomura u. a. 2017] NOMURA, Ryohei; HARIGAI, Toru; SUDA, Yoshiyuki ; TAKIKAWA, Hirofumi: Second by Second Prediction of Solar Power Generation Based on Cloud Shadow Behavior Estimation near a Power Station. In: *AIP Conference Proceedings* Bd. 1807 AIP Publishing, 2017, 020024
- [Oberländer u. a. 2015] OBERLÄNDER, Daniel; PRAHL, Christoph; WILBERT, Stefan; MÜLLER, Sebastian; STANICKI, Badrudin ; HANRIEDER, Natalie: Cloud shadow maps from whole sky imagers and voxel carving. (2015). http://elib.dlr.de/97913/1/ICEM2015_WSI_DLR_Oberlaender.pdf
- [Peng u. a. 2015] PENG, Zhenzhou; YU, Dantong; HUANG, Dong; HEISER, John; YOO, Shinjae ; KALB, Paul: 3D cloud detection and tracking system for solar forecast using multiple sky imagers. In: *Solar Energy* 118 (2015), 496–519. <http://dx.doi.org/10.1145/2554850.2554913>. – DOI 10.1145/2554850.2554913
- [Perez u. a. 2011] PEREZ, Richard; KIVALOV, Sergey; SCHLEMMER, James; HEMKER, Karl ; HOFF, Tom: Parameterization of site-specific short-term irradiance variability. In: *Solar Energy* 85 (2011), Nr. 7, 1343–1353. <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2011.03.016>. – DOI 10.1016/j.solener.2011.03.016

- [Perez u. a. 2010] PEREZ, Richard; KIVALOV, Sergey; SCHLEMMER, James; HEMKER, Karl; RENNÉ, David ; HOFF, Thomas E.: Validation of short and medium term operational solar radiation forecasts in the US. In: *Solar Energy* 84 (2010), Nr. 12, 2161–2172. <http://dx.doi.org/10.1016/J.SOLENER.2010.08.014>. – DOI 10.1016/J.SOLENER.2010.08.014
- [Perez u. a. 2013] PEREZ, Richard; LORENZ, Elke; PELLAND, Sophie; BEAUHARNOIS, Mark; VAN KNOWE, Glenn; HEMKER, Karl; HEINEMANN, Detlev; REMUND, Jan; MÜLLER, Stefan C.; TRAUNMÜLLER, Wolfgang u. a.: Comparison of numerical weather prediction solar irradiance forecasts in the US, Canada and Europe. In: *Solar Energy* 94 (2013), 305–326. <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2013.05.005>. – DOI 10.1016/j.solener.2013.05.005
- [Prata u. Turner 1997] PRATA, AJ; TURNER, PJ: Cloud-top height determination using ATSR data. In: *Remote sensing of environment* 59 (1997), Nr. 1, 1–13. [http://dx.doi.org/10.1016/S0034-4257\(96\)00071-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00071-5). – DOI 10.1016/S0034-4257(96)00071-5
- [Quaschnig 2015] QUASCHNING, Volker: *Regenerative Energiesysteme: Technologie-Berechnung-Simulation*. Carl Hanser Verlag GmbH Co KG, 2015
- [Remund u. a. 2008] REMUND, J; PEREZ, R ; LORENZ, E: Comparison of solar radiation forecasts for the USA. In: *Proc. of the 23rd European PV Conference*, 2008, 1–9
- [Reno u. a. 2012] RENO, Matthew J.; HANSEN, Clifford W. ; STEIN, Joshua S.: Global horizontal irradiance clear sky models: implementation and analysis. In: *SANDIA report SAND2012-2389* (2012). <http://dx.doi.org/10.2172/1039404>. – DOI 10.2172/1039404
- [Rousseeuw u. Leroy 2005] ROUSSEEUW, Peter J.; LEROY, Annick M.: *Robust regression and outlier detection*. Bd. 589. John Wiley & Sons, 2005
- [Rutledge u. a. 1991] RUTLEDGE, Glenn; LEGG, Eugene ; MENZEL, Paul: Operational production of winds from cloud motions. In: *Global and Planetary Change* 4 (1991), Nr. 1-3, 141–150. [http://dx.doi.org/10.1016/0921-8181\(91\)90084-A](http://dx.doi.org/10.1016/0921-8181(91)90084-A). – DOI 10.1016/0921-8181(91)90084-A
- [Schenk u. a. 2015] SCHENK, H.; HIRSCH, T.; WITTMANN, M.; WILBERT, S.; KELLER, L. ; PRAHL, C.: Design and Operation of an Irradiance Measurement Network. In: *Energy Procedia* 69 (2015), 2019–2030. <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2015.03.212>. – DOI 10.1016/j.egypro.2015.03.212
- [Seaman u. a. 2017] SEAMAN, Curtis J.; NOH, Yoo-Jeong; MILLER, Steven D.; HEIDINGER, Andrew K. ; LINDSEY, Daniel T.: Cloud Base Height Estimation from VIIRS. Part I: Operational Algorithm Validation Against CloudSat. In: *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* (2017), Nr. 2017. <http://dx.doi.org/10.1175/JTECH-D-16-0109.1>. – DOI 10.1175/JTECH-D-16-0109.1

- [Seiz u. a. 2007] SEIZ, G; SHIELDS, J; FEISTER, U; BALTSAVIAS, EP ; GRUEN, A: Cloud mapping with ground-based photogrammetric cameras. In: *International Journal of Remote Sensing* 28 (2007), Nr. 9, 2001–2032. <http://dx.doi.org/10.1080/01431160600641822>. – DOI 10.1080/01431160600641822
- [Sharma u. a. 2016] SHARMA, Som; VAISHNAV, Rajesh; SHUKLA, Munn V.; KUMAR, Prashant; KUMAR, Prateek; THAPLIYAL, Pradeep K.; LAL, Shyam ; ACHARYA, Yashwant B.: Evaluation of cloud base height measurements from Ceilometer CL31 and MODIS satellite over Ahmedabad, India. In: *Atmospheric Measurement Techniques* 9 (2016), Nr. 2, 711–719. <http://dx.doi.org/10.5194/amt-9-711-2016>. – DOI 10.5194/amt-9-711-2016
- [Shaw u. Nugent 2013] SHAW, Joseph A.; NUGENT, Paul W.: Physics principles in radiometric infrared imaging of clouds in the atmosphere. In: *European Journal of Physics* 34 (2013), Nr. 6, S111. <http://dx.doi.org/10.1088/0143-0807/34/6/S111>. – DOI 10.1088/0143-0807/34/6/S111
- [Shields u. a. 1998] SHIELDS, JE; KARR, ME; TOOMAN, TP; SOWLE, DH ; MOORE, ST: The Whole Sky Imager – A Year of Progress. In: *Eighth Atmospheric Radiation Measurement (ARM) Science Team Meeting, Tucson, Arizona, 1998*, S. 23–27
- [Singleton 1940] SINGLETON, Robert R.: A method for minimizing the sum of absolute values of deviations. In: *The Annals of Mathematical Statistics* 11 (1940), Nr. 3, 301–310. <http://dx.doi.org/10.1214/aoms/1177731869>. – DOI 10.1214/aoms/1177731869
- [Urquhart u. a. 2015] URQUHART, B; KURTZ, B; DAHLIN, E; GHONIMA, M; SHIELDS, JE ; KLEISSL, J: Development of a sky imaging system for short-term solar power forecasting. In: *Atmospheric Measurement Techniques* 8 (2015), Nr. 2, 875–890. <http://dx.doi.org/10.5194/amt-8-875-2015>. – DOI 10.5194/amt-8-875-2015
- [Wang u. a. 2016] WANG, Guang; KURTZ, Ben ; KLEISSL, Jan: Cloud base height from sky imager and cloud speed sensor. In: *Solar Energy* 131 (2016), 208–221. <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2016.02.027>. – DOI 10.1016/j.solener.2016.02.027
- [Wang u. Rossow 1995] WANG, Junhong; ROSSOW, William B.: Determination of Cloud Vertical Structure from Upper-Air Observations. In: *Journal of Applied Meteorology* 34 (1995), Nr. 10, 2243–2258. [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0450\(1995\)034<2243:DOCVSF>2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0450(1995)034<2243:DOCVSF>2.0.CO;2). – DOI 10.1175/1520-0450(1995)034<2243:DOCVSF>2.0.CO;2
- [Wang u. a. 2000] WANG, Junhong; ROSSOW, William B. ; ZHANG, Yuanchong: Cloud Vertical Structure and Its Variations from a 20-Yr Global Rawinsonde Dataset. In: *Journal of climate* 13 (2000), Nr. 17, 3041–3056. [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0442\(2000\)013<3041:CVSAIV>2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0442(2000)013<3041:CVSAIV>2.0.CO;2). – DOI 10.1175/1520-0442(2000)013<3041:CVSAIV>2.0.CO;2

- [Wetterdienst 1990] WETTERDIENST, Deutscher: Internationaler Wolkenatlas. In: *Selbstverlag des Deutschen Wetterdienst, Offenbach* (1990)
- [Wilbert u. a. 2016] WILBERT, Stefan; NOURI, Bijan; PRAHL, Christoph; GARCIA, G; RAMIREZ, Lourdes; ZARZALEJO, LF; VALENZUELA, Loreto; FERRERA, F; KOZONEK, N ; LIRIA, J: Application of Whole Sky Imagers for Data Selection for Radiometer Calibration. In: *EU PVSEC 2016 Proceedings* (2016), 1493–1498. <http://dx.doi.org/10.4229/EUPVSEC20162016-5AO.8.6>. – DOI 10.4229/EUPVSEC20162016-5AO.8.6
- [WMO 1956] WMO: International Cloud Atlas. (1956)
- [Wood-Bradley u. a. 2012] WOOD-BRADLEY, Philip; ZAPATA, José; PYE, John u. a.: Cloud tracking with optical flow for short-term solar forecasting. In: *Solar Thermal Group, Australian National University, Canberra, Australien* (2012). <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.717.888>
- [Zehner u. a. 2012] ZEHNER, Mike; MOLL, Mario; THALER, Stefan; SCHRANK, Oliver; HARTMANN, Matthias; MAYER, Bernhard; BETTS, Thomas; GOTTSCHALG, Ralph; BEHRENS, Klaus; RIECKE, Wolfgang u. a.: Quantifizierung von Einstrahlungsüberhöhungen in hoch aufgelösten DWD-Datensätzen für verschiedene Standorte in Deutschland. In: *PV-Symposium, Kloster Banz (Bad Staffelstein), Germany*, 2012
- [Zhang u. a. 2010] ZHANG, Jinqiang; CHEN, Hongbin; LI, Zhanqing; FAN, Xuehua; PENG, Liang; YU, Yu ; CRIBB, Maureen: Analysis of cloud layer structure in Shouxian, China using RS92 radiosonde aided by 95 GHz cloud radar. In: *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 115 (2010), Nr. D7. <http://dx.doi.org/10.1029/2010JD014030>. – DOI 10.1029/2010JD014030
- [Zhang u. a. 2013] ZHANG, Jinqiang; LI, Zhanqing; CHEN, Hongbin ; CRIBB, Maureen: Validation of a radiosonde-based cloud layer detection method against a ground-based remote sensing method at multiple ARM sites. In: *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 118 (2013), Nr. 2, 846–858. <http://dx.doi.org/10.1029/2012JD018515>. – DOI 10.1029/2012JD018515